



ЭНИЦ  
РОСАТОМ

# 65 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Под редакцией  
доктора технических наук,  
профессора В.Н. Блинкова

Электрогорск  
2023



ЭНИЦ  
РОСАТОМ

Акционерное общество  
«Электрогорский научно-исследовательский центр  
по безопасности атомных электростанций»

# **65 ЛЕТ** **ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ** **ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

СБОРНИК АННОТАЦИЙ

Составители: д-р техн. наук, проф. В.Н. Блинков,  
д-р техн. наук В.А. Гашенко

Электрогорск  
2023

УДК 621.039.001.891.5

ББК 31.4

Ш 52

Ш 52     **65 лет исследований и испытаний для атомной энергетики. Сборник аннотаций** / Под ред. В.Н. Блинкова. — Электрогорск: АО «ЭНИЦ», 2023. — 420 с.

ISBN 978-5-88777-040-6

В сборнике представлено около семисот аннотаций наиболее значимых экспериментальных и расчётных НИР и НИОКР, выполненных в Электрогорском научно-исследовательском центре по безопасности атомных электростанций со дня его основания (за 65 лет).

Книга содержит информацию, представляющую интерес для специалистов научных и проектно-конструкторских организаций, осуществляющих свою деятельность в областях атомной и тепловой энергетики.

УДК 621.039.001.891.5

ББК 31.4

ISBN 978-5-88777-040-6

© АО «ЭНИЦ», 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	5
НИОКР ЭИЛ 1958–1960 гг. ....	6
Расчетные и экспериментальные исследования теплогидравлических процессов применительно к реактору типа ВВЭР (В-1) .....	6
Экспериментальные исследования теплогидравлических процессов в разных типах парогенераторов .....	9
Испытания сепараторов различного типа .....	10
Выполнение экспериментов применительно к реактору ВК-50 .....	10
Работы исследовательского характера .....	11
Работы прикладного характера .....	11
Работы по теме «Коррозионные испытания оборудования» .....	12
НИОКР ЭИЛ 1961–1970 гг. ....	13
Работы применительно к ВВЭР .....	13
Работы применительно к кипящему реактору ВК-50 .....	18
Работы применительно к гомогенному реактору ГР-2 .....	24
Работы применительно к кипящему водо-водяному реактору ТВП-4 .....	25
Работы применительно к кипящему реактору канального типа ЭГП-6 .....	26
Работы в обоснование проектных решений по реактору РБМК .....	27
Работы применительно к РУ специального назначения .....	34
Отработка перспективных конструкций сепараторов пара .....	41
Работы прикладного характера по испытаниям головных образцов оборудования, спецарматуры и др. ....	42
Работы исследовательского поискового характера в части исследования теплогидравлических процессов в элементах ЯЭУ .....	46
НИОКР ЭИЛ–ЭНИЦ 1971–1980 гг. ....	54
Работы применительно к ВВЭР .....	54
Работы применительно к реактору АМБ-II, Белоярская АЭС им. И.В.Курчатова .....	61
Работы в обоснование проектных решений по реакторам типа РБМК [РБМК-1000 (1500, 2000, РБМ-КП-2400)] .....	68

Работы применительно к кипящим реакторам корпусного типа . . . . .	84
Работы применительно к РУ специального назначения . . . . .	91
Работы исследовательско-поискового характера в части изучения теплогидравлических процессов в элементах ЯЭУ . . . . .	95
<b>НИОКР ЭИЛ–ЭНИС ВНИИАЭС 1981–1990 гг.</b> . . . . .	<b>102</b>
Работы применительно к ВВЭР . . . . .	102
Работы применительно к реактору АСТ-500 . . . . .	108
Работы в обоснование проектных решений реакторов типа РБМК (1000, 1500, 2000), РБМ-КП-2400, МКЭР. . . . .	112
Работы применительно к РУ специального назначения . . . . .	140
Отработка перспективных конструкций сепараторов пара . . . . .	142
Работы исследовательско-поискового характера . . . . .	145
Работы прикладного характера . . . . .	151
<b>НИОКР ЭНИС ВНИИАЭС–ЭНИЦ ВНИИАЭС 1991–2000 гг.</b> . . . . .	<b>159</b>
Работы применительно к ВВЭР . . . . .	159
Работы применительно к РБМК. . . . .	189
Работы применительно к реакторной установке АСТ-500. . . . .	205
Работы исследовательско-поискового характера . . . . .	205
Работы прикладного характера . . . . .	215
<b>НИОКР ЭНИЦ ВНИИАЭС–ОАО «ЭНИЦ» 2001–2010 гг.</b> . . . . .	<b>219</b>
Работы применительно к ВВЭР . . . . .	219
Работы применительно к РБМК. . . . .	287
Работы исследовательско-поискового характера . . . . .	310
Работы прикладного характера . . . . .	314
<b>НИОКР ОАО «ЭНИЦ» — АО «ЭНИЦ» 2011–2017 гг.</b> . . . . .	<b>326</b>
Работы применительно к ВВЭР . . . . .	326
Работы применительно к РБМК. . . . .	344
Работы исследовательско-поискового характера . . . . .	359
Работы прикладного характера . . . . .	362
<b>Работы АО «ЭНИЦ» 2018–2023 гг.</b> . . . . .	<b>378</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Теория — это хорошая вещь,  
но правильный эксперимент остается навсегда.

*Академик Петр Леонидович Капица*

Настоящий сборник аннотаций научных трудов представляет обзор научно-исследовательских работ, выполненных в Электрогорском научно-исследовательском центре по безопасности АЭС за 65 лет деятельности, начиная с даты создания в соответствии с Распоряжением Совета Министров СССР № 6992 р от 01.12.1956 и по настоящее время.

Представлены главным образом экспериментальные работы по термогидравлике, термомеханике, водным технологиям и материаловедению. Отчетные материалы по всем работам хранятся в технической библиотеке АО «ЭНИЦ».

Полагаю, что представленные в сборнике результаты выполненных в АО «ЭНИЦ» НИР и НИОКР с момента его основания являются существенным вкладом в научно-инженерное обеспечение развития атомной энергетики России.

*В.Н. Блинков*  
Научный руководитель АО «ЭНИЦ»,  
доктор технических наук,  
профессор

# НИОКР ЭИЛ 1958–1960 гг.

## Расчетные и экспериментальные исследования теплогидравлических процессов применительно к реактору типа ВВЭР (В-1)

### Изучение поля скоростей в межстержневом зазоре кассеты реактора ВВЭР

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин (ЭНИИ);  
исполнители: инженеры В.К. Орлов, П.А. Целищев; аспирант Цю-Ли-Дзянь*

Представлены результаты экспериментального исследования поля скоростей при изотермическом движении воды в межтрубном зазоре пучка с геометрией расположения тепловыделяющих элементов кассеты ВВЭР. Опыты проводились при средних скоростях воды в пучке от 3,3 до 4,84 м/с и чисел Re от 40900 до 68100 соответственно.

Поле скоростей измерялось для правильного расположения стержней и при изменении расстояния между двумя из них от 4,3 до 0,8 мм. В результате опытов построены кривые распределения скоростей в межтрубном зазоре пучка. Кривые свидетельствуют, что при нормальной геометрии скорость в узком зазоре практически не отличается от средней по ячейке. При уменьшении зазора скорость потока в нём незначительно снижается.

Так, при средней скорости в канале  $W=4,8$  м/с и уменьшении зазора от нормального  $\delta_0=4,3$  мм до  $\delta=1,4$  мм скорость в узком сечении зазора снижается на 20%. Поэтому нарушение геометрии пучка в канале ВВЭР в тепловом отношении не опасно.

*Изучение поля скоростей в межстержневом зазоре кассеты реактора ВВЭР: отчёт о НИР/ЭИЛ Главтомяэнерго, ЭНИИ АН СССР им. Г.М. Кржижановского; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: В.К. Орлов, П.А. Целищев, Цю-Ли-Дзянь. — М., 1958. — 38 с. — Инв. № 1.*

### Расчет гидромеханической устойчивости работы кассеты аппарата ВВЭР

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин (ЭНИИ);  
исполнители: инженеры В.К. Орлов, П.А. Целищев*

Целью работы было расчётное исследование возможности «запаривания» отдельных тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) или в целом кассеты реактора ВВЭР в связи с возможностью по уточнённым расчётам поверхностного кипения на отдельных ТВЭлах кассеты. Расчёты проведены для проектных параметров Воронежской станции.

На основании проведенных расчетов сделан вывод, что при проектных тепловых нагрузках и скоростях на входе в кассету ВВЭР гидравлический режим работы канала является устойчивым.

*Расчет гидромеханической устойчивости работы кассеты аппарата ВВЭР: отчёт о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, ЭНИИ им Г.М. Кржижановского; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: В.К. Орлов, П.А. Целищев. — М., 1958. — 22 с. — Инв. № 3.*

### **Исследование температурного режима оболочки твэлов аппарата ВВЭР в месте её касания с планкой дистанционирующей решётки**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин;*

*исполнители: инженеры В.К. Орлов, П.А. Целищев; аспирант Цю-Ли-Дзянь*

Цель работы — исследование температурного поля металла оболочки твэлов в зоне дистанционирующей решётки применительно к конструкции кассеты ВВЭР. Показано, что оболочка твэл в зоне решётки в температурном отношении должна вполне надёжно работать при проектных параметрах ВВЭР и тепловых нагрузках до  $1,5 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>2</sup>·ч.

*Исследование температурного режима оболочки твэлов аппарата ВВЭР в месте её касания с планкой дистанционирующей решётки : отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: В.К. Орлов, П.А. Целищев, Цю-Ли-Дзянь. — М., 1959. — 76 с. — Инв. № 5.*

### **Исследование теплоотдачи и гидродинамики пучка при развитом поверхностном кипении на его отдельных элементах**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин;*

*исполнители: инженеры В.К. Орлов, П.А. Целищев; аспирант Цю-Ли-Дзянь*

Работа посвящена проведению опытов на семитрубном неравномерно обогреваемом пучке с геометрией кассеты ВВЭР. Опытами установлено влияние дистанционирующих решеток на температурный режим пучка, а также отсутствие «запаривания» трубки, работающей в режиме поверхностного кипения.

Выявлены условия возникновения поверхностного кипения в пучке. Определены коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления.

*Исследование теплоотдачи и гидродинамики пучка при развитом поверхностном кипении на его отдельных элементах: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: В.К. Орлов, П.А. Целищев, Цю-Ли-Дзянь. — М., 1959. — 76 с. — Инв. № 4.*

### **Исследование истечения недогретой до температуры насыщения воды из отверстий**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин;*

*исполнители: инженеры Л.Д. Бойко, А.В. Дубровин*

В работе представлены результаты исследований по истечению недогретой до температуры насыщения воды из замкнутого объёма через цилиндрические насадки разных диаметров и длин применительно к случаю разрыва трубопроводов циркуляционного контура ВВЭР.

Определены кривые спада давления в объёме при открытии отверстий, произведён расчёт расходов кипящей воды через насадки и даны рекомен-

дации по методам конденсации пара в объёме помещения, в котором произошёл разрыв трубы или образовались неплотности в арматуре контура.

*Исследование истечения недогретой до температуры насыщения воды из отверстий: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго, рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Л.Д. Бойко, А.В. Дубровин. — М., 1959. — 86 с. — Инв. № 115.*

### **Исследование теплоотдачи и гидравлического сопротивления в пучке оребренных твэл аппарата ВВЭР**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнители: аспирант Цю-Ли-Дзянь, инженеры В.К. Орлов, П.А. Целищев*

В рамках работы проведены опыты с семитрубными продольноомываемыми пучками со спиральным оребрением и с гладким пучком с дистанционирующими решётками применительно к сборке твэлов ВВЭР. Опытами установлено влияние дистанционирующих решёток и спиральных рёбер на теплообмен и гидродинамику пучков. Показано, что с уменьшением шага набивки рёбер теплообмен улучшается, а гидравлическое сопротивление остаётся приблизительно постоянным.

*Исследование теплоотдачи и гидравлического сопротивления в пучке оребренных твэл аппарата ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Цю-Ли-Дзянь, В.К. Орлов, П.А. Целищев. — М., 1960. 54 с. — Инв. № 10.*

### **Опытное изучение живучести гладкого пучка твэл аппарата ВВЭР в проектных условиях эксплуатации**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнители: инженеры В.К. Орлов, П.А. Целищев*

Цель работы — проведение в течение 3112 часов испытаний необогреваемой семиэлементной модели кассеты аппарата ВВЭР на механический износ и коррозию в условиях, приближающихся к проектным. Представлены результаты испытаний.

Отмечается, что конструкция крепежа твэл в чехловой трубе, а именно глухое крепление их в верхней пошаговой решётке при плавающей нижней, не обеспечивает достаточной устойчивости элементов кассеты к механическому износу от истирания за счёт вибрации.

*Опытное изучение живучести гладкого пучка твэл аппарата ВВЭР в проектных условиях эксплуатации: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; рук. чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполн.: В.К. Орлов, П.А. Целищев. — М., 1960. — 27 с. — Инв. № 119.*

## **Экспериментальные исследования теплогидравлических процессов в разных типах парогенераторов**

### **Исследование работы модели парогенератора В-1**

*Руководитель темы д-р техн. наук Г.Е. Холодовский;*

*исполнители: инженеры В.К. Бебешин, А.Н. Воскресенский*

Представлены результаты исследования паропроизводительности модели парогенератора В-1 и влажности вторичного пара при различных тепловых нагрузках, при подводе питательной воды в середину пучка и в нижнюю часть парогенератора, при номинальных (32 атм) и пониженных давлениях вторичного пара, при которых, как отмечается, обнаружено явление «запаривания» трубного пучка, т.е. прекращение повышения его производительности при достижении определённого температурного напора.

*Исследование работы модели парогенератора В-1: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; рук. Г.Е. Холодовский; исполн.: В.К. Бебешин, А.Н. Воскресенский. — М., 1958. — 52 с. — Инв. № 110.*

### **Исследование конденсации пара внутри горизонтальных труб парогенератора**

*Руководитель темы д-р техн. наук Г.Е. Холодовский;*

*исполнители: инженеры Л.Д. Бойко, А.В. Дубровин*

Представлены результаты исследования процесса конденсации пара внутри труб разной длины и разного диаметра при давлениях пара 12,5–101 ата и различных тепловых нагрузках  $(22,5 \div 205) \cdot 10^3$  ккал/м<sup>2</sup>·ч.

*Исследование конденсации пара внутри горизонтальных труб парогенератора: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; рук. Г.Е. Холодовский; исполн.: Л.Д. Бойко, А.В. Дубровин. — М., 1958. — 50 с. — Инв. № 111.*

### **Исследование разрыва трубы, заполненной газом, под водой**

*Руководитель темы д-р техн. наук Г.Е. Холодовский;*

*исполнители: инженеры Л.Д. Бойко, А.В. Дубровин*

Представлены экспериментальные данные по воздействию разрыва трубы в пучке теплообменника парогенератора с газовым теплоносителем, протекающим внутри труб, на соседние трубы пучка и на корпус теплообменника. Установлено, что разрыв трубы пучка не приводит к повреждению или деформации соседних труб, однако, давление внутри корпуса повышается на незначительное время.

*Исследование разрыва трубы, заполненной газом, под водой: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; рук. Г.Е. Холодовский; исполн.: Л.Д. Бойко, А.В. Дубровин. — М., 1959. — 26 с. — Инв. № 113.*

## Испытания сепараторов различного типа

### Испытание турбинного сепаратора влаги системы ЦКТИ, выполненного ХТГЗ

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин;  
исполнители: д-р техн. наук Г.Е. Холодовский, инженер И.С. Дубровский*

Представлены результаты испытаний, на основании которых была выполнена реконструкция сепаратора.

*Испытание турбинного сепаратора влаги системы ЦКТИ, выполненного ХТГЗ: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго, рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Г.Е. Холодовский, И.С. Дубровский. — М., 1959. — 24 с. — Инв. № 112.*

### Испытания модели центробежно-плёночного сепаратора

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин;  
исполнители: д-р техн. наук Г.Е. Холодовский, инженеры В.К. Бебешин, А.Н. Воскресенский*

Представлены результаты испытаний модели центробежно-плёночного сепаратора ЭНИН; показаны эффективность и перспективность его конструкции. Делается вывод о целесообразности продолжения работ по созданию центробежно-плёночного сепаратора большей производительности.

*Испытания модели центробежно-плёночного сепаратора: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Г.Е. Холодовский, В.К. Бебешин, А.Н. Воскресенский. — М., 1959. — 20 с. — Инв. № 114.*

## Выполнение экспериментов применительно к реактору ВК-50

### Изучение на модели гидродинамических условий работы тягового участка и опускного канала реактора ВК-50

*Руководитель темы д-р техн. наук Г.Е. Холодовский;  
исполнители: инженеры И.С. Дубровский, А.Г. Лобачёв*

Представлены результаты, полученные в серии опытов по исследованию гидродинамики циркуляционного контура модели кипящего реактора ВК-50 на стационарных режимах при давлениях 100,75 и 30 атм при различных паровых нагрузках. Представлены также результаты по влажности пара, выделяемого сепаратором.

*Изучение на модели гидродинамических условий работы тягового участка и опускного канала реактора ВК-50: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; рук. Г.Е. Холодовский; исполн.: И.С. Дубровский, А.Г. Лобачёв. — М., 1960. — 96 с. — Инв. № 117.*

## Работы исследовательского характера

### Моделирование кипения в вертикальном канале

*Руководитель темы д-р техн. наук Г.Е. Холодовский;  
исполнители: инженеры А.В. Дубровин, И.П. Корнюхин*

Работа носила методический характер и была посвящена сопоставлению гидродинамических условий работы вертикального кольцевого канала при парообразовании на поверхности внутренней трубки и при подаче в канал сухого насыщенного пара через отверстия в той же трубке. Получены зависимости перепада давления в канале от скорости циркуляции ( $W_0$ ) и расходного объёмного паросодержания ( $\beta$ ) при давлениях 32, 60 и 100 ата в пределах  $W_0 = 0,5 \div 1,5$  м/с и  $\beta = 0,2 \div 0,8$ . Сравнение результатов опытов на канале с кипяtilьной и барботажной трубками показали возможность использования барботажа для замены кипения в вертикальных каналах гидродинамических моделей и пригодность принятой методики расчёта барботажной трубки. Установлено, что уменьшение количества отверстий на барботажной трубке благоприятно сказывается на работе канала, так как повышается устойчивость истечения пара через отверстия и стабилизируется длина парообразующего участка.

*Моделирование кипения в вертикальном канале: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; рук. д-р техн. наук Г.Е. Холодовский; исполн.: А.В. Дубровин, И.П. Корнюхин. — М., 1960. — 79 с. — Инв. № 8.*

## Работы прикладного характера

### Исследование температурного режима работы колонки «С»

*Руководитель темы д-р техн. наук Г.Е. Холодовский;  
исполнители: инженеры В.К. Бебешин, А.М. Воскресенский*

В рамках работы по программе ОКБ Гидропресс проведены исследования уплотнений разного типа на колонке «С». Представлены полученные результаты.

*Исследование температурного режима работы колонки «С»: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; рук. Г.Е. Холодовский; исполн.: В.К. Бебешин, А.М. Воскресенский. — М., 1959. — 26 с. — Инв. № 109.*

### Исследование температурного режима работы колонки «С» и испытание уплотнений на протечку греющей среды

*Руководитель темы д-р техн. наук Г.Е. Холодовский;  
исполнители: инженеры А.М. Воскресенский, В.К. Бебешин, Г.Г. Шевяков*

Представлены результаты проведённой третьей серии испытаний уплотнений СУЗ аппаратов различного типа («В» и «К»).

*Исследование температурного режима работы колонки «С» и испытание уплотнений на протечку греющей среды: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского — ЭИЛ Главатомэнерго; рук. Холодовский; исполн.: А.М. Воскресенский, В.К. Бебешин, Г.Г. Шевяков. — М., 1960. — 57 с. — Инв. № 116.*

## **Работы по теме «Коррозионные испытания оборудования»**

### **Коррозионные испытания стали 1X18H19T в атмосфере насыщенного пара под давлением 50 атм с добавками некоторых агрессиворов**

*Руководитель темы канд. техн. наук К.А. Несмеянова;  
исполнитель инженер В.Г. Касаткина*

Представлены данные по коррозионной устойчивости стали 1X18H19T в статических условиях в насыщенном паре (50 атм) – деаэрированном и с добавками кислорода и элементарного йода.

*Коррозионные испытания стали 1X18H19T в атмосфере насыщенного пара под давлением 50 атм с добавками некоторых агрессиворов; отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; рук. К.А. Несмеянова; исполн. В.Г. Касаткина, М., 1959. — 28 с. — Инв. № 6.*

### **Исследование коррозионной стойкости титановых сплавов и сварочных швов титанового сплава в растворе серной кислоты и серноокислого урана в добавками йода и брома при рабочих параметрах реактора ГР-2**

*Руководитель темы канд. техн. наук К.А. Несмеянова;  
исполнитель инженер В.Г. Касаткина*

Представлены результаты коррозионных испытаний титановых сплавов и их сварных соединений применительно к рабочей среде и параметрам реактора ГР-2.

*Исследование коррозионной стойкости титановых сплавов и сварочных швов титанового сплава в растворе серной кислоты и серноокислого урана в добавками йода и брома при рабочих параметрах реактора ГР-2: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; рук. К.А. Несмеянова; исполн. В.Г. Касаткина. — М., 1960. — 20 с. — Инв. № 122.*

# НИОКР ЭИЛ 1961–1970 гг.

## Работы применительно к ВВЭР

### **Исследование критических тепловых потоков при сближении и касании поверхностей**

*Руководитель работы д-р техн. наук. И.Т. Аладьев; исполнители: инженеры В.А. Ефимов (ЭНИН), С.Я. Рыскин, Д.П. Трутнев (ЭИЛ)*

Представлены результаты опытов по определению  $q_{кр.}$  в кольцевом канале с односторонним и двусторонним обогревом при коаксиальном и эксцентричном положении трубок в потоке воды при давлении 100 атм и недогревах до температуры насыщения 80–0 °С, массовых паросодержаниях (х) 0–35%, массовых скоростях  $\rho w = 300–5000$  кг/м<sup>2</sup>·с.

*Исследование критических тепловых потоков при сближении и касании поверхностей: отчет о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; рук. И.Т. Аладьев; исполн.: В.А. Ефимов, С.Я. Рыскин, Д.П. Трутнев. — М., 1961. — 21 с. — Инв. № 124.*

### **Исследование критических тепловых потоков в каналах сложной формы**

*Руководитель темы д-р техн. наук. И.Т. Аладьев; исполнители: инженеры В.А. Ефимов (ЭНИН), Л.Д. Додонов, Д.П. Трутнев, В.Н. Яшнов (ЭИЛ)*

Приводится описание стенда для изучения теплообмена и критических тепловых потоков при кипении воды в различных каналах, а также описание экспериментальной модели ВВЭР.

Приводятся данные предварительных опытов по влиянию дистанцирующей решетки в модели канала ВВЭР на величину критического теплового потока и место возникновения кризиса теплообмена.

*Исследование критических тепловых потоков в каналах сложной формы: отчет о НИР / ЭИЛ МСЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук. И.Т. Аладьев; исполн.: В.А. Ефимов, Л.Д. Додонов, Д.П. Трутнев, В.Н. Яшнов. — М., 1961. — 39 с. — Инв. № 285.*

### **Изучение влияния искривления твэл на тепловой режим**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнители: инженеры В.Н. Орлов, П.А. Целищев, В.Д. Байнякшин (ЭИЛ)*

Приведены результаты исследования распределения температур по периметру элементов трехтрубного пучка с геометрией кассеты ВВЭР, при их местном сближении. Опыты проводились при тепловых потоках  $0,3 \div 1,7 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>2</sup>·ч, скоростях воды  $4,3 \div 1,0$  м/с и температуре воды на входе  $258 \div 275$  °С при одновременном сближении трубок до минимальных зазоров 3,35; 1,15 и 0,12 мм, а также их плотном касании.

Опытами установлено, что распределение температур по периметру трубок зависит от теплового потока и скорости воды. При минимальных зазорах между трубками  $\delta \geq 0,12$  мм максимальная температура трубки приблизительно соответствует температуре стенки при поверхностном кипении. При плотном касании трубок наблюдается резкое увеличение температуры стенки.

*Изучение влияния искривления твэл на тепловой режим: отчет о НИР / ЭИЛ МСЭС СССР, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: В.Н. Орлов, П.А. Целищев, В.Д. Байнякшин. — М., 1961. — 71 с. — Инв. № 284.*

### **Опытное изучение живучести гладкого и оребрѐнного пучков твэлов аппарата ВВЭР в проектных условиях эксплуатации**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнители: инженеры В.Н. Орлов, П.А. Целищев*

Представлены результаты стендовых испытаний необогреваемых кассет аппарата ВВЭР на живучесть (устойчивость к механическому износу под воздействием вибрационных нагрузок) в условиях длительной (до 5739 часов) эксплуатации.

*Опытное изучение живучести гладкого и оребрѐнного пучков твэлов аппарата ВВЭР в проектных условиях эксплуатации: отчет о НИР / ЭИЛ МСЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: В.Н. Орлов, П.А. Целищев. — М., 1961. — 39 с. — Инв. № 286.*

### **Исследование критических тепловых потоков в модели канала ВВЭР**

*Руководитель работы д-р техн. наук И.Т. Аладьев (ЭНИИ); исполнители: инженеры В.А. Ефимов (ЭНИИ), Л.Д. Трутнева, Д.П. Трутнев (ЭИЛ)*

Представлены результаты исследований критических тепловых потоков при кипении воды в модели канала ВВЭР как без дистанционирующих решеток, так и при наличии дистанционирующих устройств при давлении 100 и 140 ата и различных  $rw$ , недогревах и  $X$ . Получены данные о влиянии интенсивности обогрева окружающих поверхностей на  $q_{кр}$  на центральном стержне. В результате опытов с дистанционирующими решетками признаются неосновательными опасения преждевременного начала кризиса под планками решеток.

*Исследование критических тепловых потоков в модели канала ВВЭР»: отчет о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ УДС ЭиС; рук. И.Т. Аладьев; исполн.: В.А. Ефимов, Л.Д. Трутнева, Д.П. Трутнев. — М., 1961. — 81 с. — Инв. № 29.*

## **Исследование условий запаривания трубного пучка на модели парогенератора В-1**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин (ЭНИН); исполнитель инженер В.К. Бебешин (ЭИЛ)*

На модели парогенератора В-1 (для НВ АЭС) проведены опыты, позволяющие установить отсутствие явления запаривания трубного пучка.

*Исследование условий запаривания трубного пучка на модели парогенератора В-1: отчет о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ ГУКС МЭиЭ, рук. Г.Н. Кружилин; исполн. В.К. Бебешин. — М., 1962. — 28 с. — Инв. № 135.*

## **Исследование кризиса кипения в продольно-омываемых пучках стержневых ТВЭЛ**

*Руководитель работы д-р техн. наук. И.Т. Аладьев; исполнители: инженеры В.А. Ефимов (ЭНИН), Л.Д. Трутнева, Д.П. Трутнев (ЭИЛ)*

Представлены экспериментальные данные по кризису кипения в опытах с трех- и семистержневых пучках с обогреваемой длиной 200 и 400 мм применительно к кассете и при параметрах ВВЭР.

*Исследование кризиса кипения в продольно-омываемых пучках стержневых твэл: отчет о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, рук. И.Т. Аладьев; исполн.: В.А. Ефимов, Л.Д. Трутнева, Д.П. Трутнев. — М., 1963. — 63 с. — Инв. № 146.*

## **Определение коррозионной стойкости специальных сталей и сплавов в потоке воды с параметрами первого контура АЭС**

*Руководитель темы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН); исполнитель инженер В.Г. Касаткина (ЭИЛ)*

Представлены результаты коррозионных испытаний образцов углеродистых и нержавеющей сталей, а также циркониевых сплавов в потоке чистой воды при параметрах первого контура ВВЭР.

*Определение коррозионной стойкости специальных сталей и сплавов в потоке воды с параметрами первого контура АЭС: отчет о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ МЭиЭ СССР; рук. К.А. Несмеянова; исполн. В.Г. Касаткина. — М., 1963. — 63 с. — Инв. № 141.*

## **Определение коррозионной стойкости углеродистых сталей в воде при различных значениях рН при температуре 300–350 °С**

*Руководитель темы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН); исполнители: инженер В.Г. Касаткина (ЭИЛ), лаборант Т.А. Никонова (ЭНИН)*

Представлены результаты коррозионных испытаний стали 20, а также образцов циркониевых сплавов в воде при  $T=300-350$  °С,  $P=168$  атм при

различных значениях рН и при постоянном присутствии в воде растворенного кислорода.

*Определение коррозионной стойкости углеродистых сталей в воде при различных значениях рН при температуре 300–350 °С: отчет о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ; рук. К.А. Несмеянова; исполн.: В.Г. Касаткина, Т.А. Никонова. — М., 1963. — 43 с. — Инв. № 142.*

### **Испытание коррозионной стойкости нержавеющей и низколегированных сталей в воде высоких параметров**

*Руководитель работы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИИ); исполнители: канд. техн. наук Е.Б. Мацкевич (ЭНИИ), инженер В.Г. Касаткина (ЭИЛ)*

Представлены результаты стендовых коррозионных испытаний восьми марок нержавеющей и низколегированных сталей в потоке деаэрированной обессоленной воды при давлении 140 атм и температуре 300 °С.

*Испытание коррозионной стойкости нержавеющей и низколегированных сталей в воде высоких параметров: отчет о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ УКС ГПК по ЭиЭ СССР; рук. К.А. Несмеянова; исполн.: Е.Б. Мацкевич, инженер В.Г. Касаткина. — М., 1963. — 16 с. — Инв. № 144.*

### **Исследование критических тепловых потоков в пучке труб с дистанционирующими устройствами**

*Руководитель работы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнители: инженер Д.П. Трутнев (ЭИЛ), Югай Тезей (ЭНИИ)*

Представлены экспериментальные данные по  $q_{кр}$  в пучке труб при наличии дистанционирующих устройств (четырёх типов) при давлении теплоносителя 98 и 103 бар.

*Исследование критических тепловых потоков в пучке труб с дистанционирующими устройствами: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Д.П. Трутнев, Югай Тезей. — М., 1965. — 53 с. — Инв. № 302.*

### **Исследование работы греющих поверхностей выпарных установок**

*Руководитель темы канд. техн. наук Н.А. Несмеянова (ЭНИИ); исполнители: инженеры Ю.Н. Головатюк, А.А. Хохонова (ЭИЛ)*

Представлены результаты испытаний модели греющей поверхности однокорпусной выпарной установки, предназначенной для очистки продуктивных вод 1 контура Нововоронежской АЭС.

*Исследование работы греющих поверхностей выпарных установок: отчет о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ ГПК по ЭиЭ СССР; рук. Н.А. Несмеянова; исполн.: Ю.Н. Головатюк, А.А. Хохонова. — М., 1965. — 29 с. — Инв. № 755.*

## **Повышение производительности парогенераторов АЭС с водо-водяными реакторами**

*Руководитель работы д-р техн. наук Г.Е. Холодовский (ЭИЛ); исполнитель инженер Л.В. Дубровин (ЭНИН)*

Представлены результаты расчетного исследования и описание усовершенствованного парогенератора повышенной производительности на базе ПГ второй очереди Ново-Воронежской АЭС

*Повышение производительности парогенераторов АЭС с водо-водяными реакторами: отчет о НИР/ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ; рук. Г.Е. Холодовский; исполн. Л.В. Дубровин. — М., 1965. — 16 с. — Инв. № 753.*

## **Экспериментальная и схемная отработка выпарки радиоактивных вод** *Исполнители: инженеры А.А. Любимов (ЭНИН), Г.С. Полякова (ЭИЛ)*

В рамках работы проведено экспериментальное исследование условий разрушения мыльной пены при истечении ее из каналов малого диаметра. Опыты проводили в испарительном аппарате с предвключенными специальными турбосепарационными устройствами и без них.

*Экспериментальная и схемная отработка выпарки радиоактивных вод: отчет о НИР/ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главтомяэнерго Минэнерго СССР; исполн.: А.А. Любимов, Г.С. Полякова. — М., 1968. — 117 с. — Инв. № 773.*

## **Экспериментальное исследование кризиса теплоотдачи в стержневой сборке с ячеистыми дистанционирующими решетками при повышенных давлениях**

*Исполнители: инженеры Д.П. Трутнев, Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, М.П. Гашенко (ЭИЛ), Югай Тезей (ЭНИН)*

Представлены результаты первого этапа экспериментального кризиса кипения воды в семистержневой сборке с ячеистыми дистанционирующими решетками (стержни диаметром 9 мм, длиной 1000 мм; режимные параметры в опытах: давление 103-186 бар;  $\rho_w=750-3200$  кг/(м<sup>2</sup>·с). применительно к сборкам реакторов В-500 и В-1000.

*Экспериментальное исследование кризиса теплоотдачи в стержневой сборке с ячеистыми дистанционирующими решетками при повышенных давлениях: отчет о НИР/ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Д.П. Трутнев, Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, М.П. Гашенко, Югай Тезей. — М., 1969. — 96 с. — Инв. № 288.*

## **Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в парогенерирующих пучках ТВЭЛ с геометрией установок В-500 и В-1000**

*Руководитель темы д-р техн. наук. Д.А. Лабунцов; руководитель работы канд. техн. наук И.С. Дубровский; исполнители: инженеры В.Л. Мухачев (ЭИЛ), Б.М. Корольков, Э.И. Ливерант (ЭНИН)*

Представлены экспериментальные данные по температурным режимам, критическим тепловым нагрузкам, истинным паросодержаниям и гидрав-

лическим сопротивлениям при вынужденном движении пароводной среды в вертикальной обогреваемой трехстержневой сборке длиной 1,2 м из труб диаметром  $9 \times 0,4$  мм при давлении 122,5–137 бар,  $\rho W = 1000\text{--}3000$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $q$  до 1,7 МВт/м<sup>2</sup> и относительных энтальпиях от  $-0,4$  до  $+0,4$ .

*Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в парогенерирующих пучках твэл с геометрией установок В-500 и В-1000: отчет о НИР / ЭИЛ «Главатомэнерго», ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук. темы Д.А. Лабунцов; рук. работы И.С. Дубровский; исполн.: В.Л. Мухачев, Б.М. Корольков, Э.И. Ливерант. — Электрогорск, 1969. — 69 с. — Инв. № 298.*

### **Исследование коррозионной стойкости конструкционных сплавов (стали 48ТС-1, 2Х13, 1Х18Н10Т и циркониевый сплав) в воде высоких параметров различного состава (с добавками борной кислоты и едкого калия)**

*Руководитель работы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИИ); исполнители: инженер В.Г. Касаткина (ЭИЛ), лаборант Т.А. Никонова (ЭНИИ)*

Испытания длительностью 1000 часов проведены в потоке деаэрированного раствора 2–3 м/с,  $T = 280$  и  $70^\circ \text{C}$ ,  $c \sim 1$  г/л борной кислоты и едкого кали при рН раствора 6,5–6,8. Представлены полученные результаты.

*Исследование коррозионной стойкости конструкционных сплавов (стали 48ТС-1, 2Х13, 1Х18Н10Т и циркониевый сплав) в воде высоких параметров различного состава (с добавками борной кислоты и едкого кали): отчет о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ; рук. К.А. Несмеянова; исполн.: В.Г. Касаткина, Т.А. Никонова. — М., 1969. — 34 с. — Инв. № 780.*

### **Работы применительно к кипящему реактору ВК-50**

#### **Изучение на модели гидродинамических условий работы тягового участка и опускного канала реактора ВК-50**

*Руководитель темы д-р техн. наук Г.Е. Холодовский (ЭИЛ); исполнитель инженер И.С. Дубровский (ЭНИИ)*

Получены результаты исследования гидродинамики циркуляционного контура реконструированной модели реактора ВК-50 на стационарных режимах при давлениях от 15 до 100 атм и различных паровых нагрузках, а также данные по влажности пара, выдаваемого аппаратом.

*Изучение на модели гидродинамических условий работы тягового участка и опускного канала реактора ВК-50: отчет о НИР / ЭИЛ МСЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук. Г.Е. Холодовский; исполн. И.С. Дубровский. — М., 1961. — 140 с. — Инв. № 283.*

### **Изучение захвата пара в опускной канал на гидродинамической модели**

*Руководитель темы д-р техн. наук Г.Е. Холодовский (ЭИЛ);*

*исполнители: инженеры А.Г. Лобачёв (ЭИЛ) И.С. Дубровский (ЭНИН)*

Получены экспериментальные данные по захвату пара в опускной канал гидродинамической модели применительно к реактору по эскизному проекту В-6 при давлении 70 атм и различных тепловых нагрузках.

*Изучение захвата пара в опускной канал на гидродинамической модели: отчёт о НИР / ЭИЛ МСЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук. Г.Е. Холодовский; исполн.: А.Г. Лобачёв, И.С. Дубровский. — М., 1961. — 41 с. — Инв. № 124.*

### **Исследование поведения различных конструкционных материалов (сплава циркония, стали 48ТС и др.) в конденсате**

*Руководитель работы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН);*

*исполнитель инженер В.Г. Касаткина (ЭИЛ)*

Представлены экспериментальные данные о коррозионной стойкости циркониевых сплавов и различных марок сталей в движущемся конденсате при температуре 300°С, давлении 154 атм, тепловой нагрузке до 1,1·106 ккал/м<sup>2</sup>·ч.

*Исследование поведения различных конструкционных материалов (сплава циркония, стали 48ТС и др.) в конденсате: отчет о НИР / ЭИЛ МСЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук. К.А. Несмеянова; исполн. В.Г. Касаткина. — М., 1961. — 23 с. — Инв. № 125.*

### **Исследование коррозионной стойкости нержавеющей стали в насыщенном паре**

*Руководитель работы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН);*

*исполнители: инженеры В.К. Орлов, П.А. Целищев, А.Г. Агеев (ЭНИН), Н.П. Сергеева (ЭИЛ)*

В рамках работы разработан стенд для проведения испытаний в заданных условиях. В основу работы стенда был положен принцип принудительной циркуляции паро-кислородной смеси при помощи эжектора, работающего на паре высокого давления, с периодической подпиткой этой смеси кислородом. Представлены результаты проведенного первого этапа испытаний длительностью 500 часов.

*Исследование коррозионной стойкости нержавеющей стали в насыщенном паре: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского — ЭИЛ МЭиЭ Руководитель работы — канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН), исполнители: инженеры В.К. Орлов, П.А. Целищев, А.Г. Агеев (ЭНИН), Н.П. Сергеева (ЭИЛ), М., 1961, Инв. № 66, 37 с.*

## **Теплоотдача при конденсации пара из пароводяной смеси**

*Руководитель темы д-р техн. наук Г.Е. Холодовский (ЭИЛ);  
исполнители: инженеры Ю.П. Изотов, А.Н. Боровская*

Экспериментально получены данные по теплоотдаче при конденсации пара, захваченного в опускном канале применительно к реактору ВК-50.

*Теплоотдача при конденсации пара из пароводяной смеси: отчёт о НИР / ЭИЛ МСЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук. Г.Е. Холодовский; исполн.: Ю.П. Изотов, А.Н. Боровская. — М., 1962. — 41 с. — Инв. № 128.*

## **Исследование встроенных сепараторов влаги для кипящих реакторов**

*Руководитель темы д-р техн. наук Г.Е. Холодовский (ЭИЛ);  
исполнители: аспирант Г.И. Гимбутис, инженер А.Г. Агеев*

Представлены результаты экспериментально исследованных встроенных центробежных сепараторов влаги диаметром 160 и 300 мм, а также результаты анализа некоторых гидродинамических условий работы центробежного сепаратора.

*Исследование встроенных сепараторов влаги для кипящих реакторов: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ МСЭС; рук. Г.Е. Холодовский; исполн.: Г.И. Гимбутис, А.Г. Агеев. — М., 1962. — 87 с. — Инв. № 67.*

## **Экспериментальная проверка методов повышения надежности и точности измерения скоростей циркуляции в каналах реактора ВК-50**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин;  
исполнители: инженеры Л.К. Тихоненко (ЭИЛ), И.С. Дубровский (ЭНИН),  
аспирант И.А. Попов (ЭНИН)*

Экспериментально проверена надежность измерения скорости циркуляции воды в параллельных каналах реактора ВК-50, рассмотрены вопросы повышения точности и надежности измерения малых скоростей воды.

*Экспериментальная проверка методов повышения надежности и точности измерения скоростей циркуляции в каналах реактора ВК-50: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ ГУКС МЭиЭ; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Л.К. Тихоненко, И.С. Дубровский, И.А. Попов. — М., 1962. — 92 с. — Инв. № 138.*

## **Исследование временных и частотных характеристик кипящих систем с естественной циркуляцией**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; отв. исполнитель инженер Г.А. Казаков (ЭНИН), исполнители: инженеры Р.А. Шугам (ЦНИИКА), О.В. Боровский (ЭИЛ)*

Представлены результаты экспериментального исследования динамики циркуляционного контура гидродинамической модели аппарата ВК-50. С помощью временных, частотных и статистических методов получены динамические характеристики по давлению и нагрузке аппарата. Опытным

путем определены пульсации различных параметров циркуляционного контура. Опыты проведены при  $P$  от 30 до 100 ата и приведенной скорости пара от 0,95 до 0,07 м/с.

*Исследование временных и частотных характеристик кипящих систем с естественной циркуляцией: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ ГУКС МЭиЭ; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Г.А. Казаков, Р.А. Шугам, О.В. Боровский. — М., 1962. — 248 с. — Инв. № 134.*

### **Исследование коррозионной стойкости стали 20 в насыщенном паре**

*Руководитель темы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИИ); исполнители: инженеры Н.П. Сергеева, Ю.Н. Головатюк*

Проведены испытания коррозионной стойкости стали 20 в насыщенном паре при среднем парциальном давлении кислорода 0,2 атм, скорость потока смеси 9,2–9,5 м/с, давление 50 атм, температура 263 °С. Установлено, что в этих условиях сталь 20 может считаться весьма стойкой, соответствующей 1 баллу коррозионной стойкости, на ней не развиваются локальные коррозионные повреждения.

*Исследование коррозионной стойкости стали 20 в насыщенном паре: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ ГУКС МЭиЭ; рук. К.А. Несмеянова; исполн.: Н.П. Сергеева, Ю.Н. Головатюк. — М., 1962. — 42 с. — Инв. № 136.*

### **Исследование встроенных сепараторов влаги для кипящих реакторов**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнители: инженеры А.Г. Агеев (ЭНИИ), В.Б. Карасёв (НИКИЭТ), А.Н. Боровская (ЭИЛ)*

Приведены результаты испытаний встроенных центробежных сепараторов влаги диаметром 160 мм с жалюзийной головкой, а также результаты испытаний турбосепараторов, предназначенных для грубого разделения пароводяной смеси. Опыты проводились при давлении 70 ата, часть опытов проведена при давлении 50 и 30 ата и при весовом паросодержании на входе 14 %.

*Исследование встроенных сепараторов влаги для кипящих реакторов: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ ГУКС; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: А.Г. Агеев, В.Б. Карасёв, А.Н. Боровская. — М., 1963. — 74 с. — Инв. № 69.*

### **Исследование устойчивости параллельной работы каналов реактора ВК-50**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнители: инженеры А.В. Дубровин, И.П. Корнюхин (ЭНИИ), М.П. Юдина (ЭИЛ)*

Получены экспериментальные данные по гидродинамике контура циркуляции реактора ВК-50 на стенде с натурной моделью активной зоны при штатных параметрах —  $P = 37, 60$  и  $90$  атм. Исследованы истинные объёмные

паросодержания в тяговом участке и подъёмных трубах кассет, скорости циркуляции воды, кратность циркуляции, нестационарные режимы.

*Исследование устойчивости параллельной работы каналов реактора ВК-50: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ ГУКС МЭиЭ; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: А.В. Дубровин, И.П. Корнюхин, М.П. Юдина. — М., 1964. — 148 с. — Инв. № 748.*

### **Испытание на живучесть модели кассеты кипящего реактора**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнитель инженер В.Д. Байнякшин (ЭИЛ)*

На специально сооружённом циркуляционном стенде проведены длительные (3000 часов) испытания модели кассеты кипящего реактора с имитаторами твэлов. В работе представлены результаты испытаний.

*Испытание на живучесть модели кассеты кипящего реактора»: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ ГУКС МЭиЭ; рук. Г.Н. Кружилин; исполн. В.Д. Байнякшин. — М., 1965. — 12 с. — Инв. № 752.*

### **Исследование условий возникновения и развития автоколебаний в контуре с естественной циркуляцией**

*Исполнитель инженер А.П. Прошутинский (ЭИЛ)*

Получены экспериментальные данные по границам области устойчивости контура с естественной циркуляцией, выведено уравнение неустановившегося движения в контуре при изменении рабочих параметров в широких пределах, дана методика аналитического расчета границ устойчивости контура естественной циркуляции.

*Отчёт ЭИЛ «Исследование условий возникновения и развития автоколебаний в контуре с естественной циркуляцией», исполнитель инженер А.П. Прошутинский, Электрогорск, 1966, Инв.№ 31, 50 с.*

### **Экспериментальная отработка головного образца встроенного циркуляционного насоса для кипящего реактора**

*Исполнители: инженеры Л.Р. Кеворков, С.В. Львов (ВНИИМЕТМАШ); техник Н.С. Куракина (ЭИЛ); инженеры Б.А. Кольчугин, В.С. Головин (ЭНИИ)*

Представлены результаты статических и предварительные результаты ресурсных испытаний опытного циркуляционного насоса с вертикальным гидроприводом.

*Экспериментальная отработка головного образца встроенного циркуляционного насоса для кипящего реактора: отчёт о НИР / ВНИИМЕТМАШ, ЭИЛ, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Л.Р. Кеворков, С.В. Львов, Н.С. Куракина, Б.А. Кольчугин, В.С. Головин. — М., 1966. — 72 с. — Инв. № 73.*

### **Исследование моделей сепараторов для кипящих реакторов на воздухо-водяном стенде**

*Научный руководитель работы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнители: инженер Е.А. Лобачёва, В.Б. Карасёв (предприятие п/я А-7291), А.Г. Агеев, И.Т. Серов (ЭНИИ)*

Представлены заключительные материалы исследования одно- и двух-ступенчатых турбосепараторов диаметром 80 и 53 мм, а также некоторые дополнительные данные по исследованиям центробежных сепараторов диаметром 160 и 250 мм, выполненных на воздухо-водяном стенде.

*Исследование моделей сепараторов для кипящих реакторов на воздухо-водяном стенде: отчёт о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук. чл.-кор. Г.Н. Кружилин; исполн.: Е.А. Лобачёва, В.Б. Карасёв, А.Г. Агеев, И.Т. Серов. — М., 1967. — 103 с. — Инв. № 14.*

### **Исследование критических тепловых потоков и областей кризиса в условиях развития автоколебаний параметров контура естественной циркуляции**

*Исполнители: инженеры А.П. Прошутинский, А.Т. Ястребов*

Представлены результаты экспериментального исследования областей кризиса и  $q_{кр}$  в зависимости от частоты автоколебаний параметров в контуре естественной циркуляции и значений режимных параметров теплоносителя.

*Исследование критических тепловых потоков и областей кризиса в условиях развития автоколебаний параметров контура естественной циркуляции: отчёт о НИР / ЭИЛ; исполн.: А.П. Прошутинский, А.Т. Ястребов — Электрогорск, 1967. — 34 с. — Инв. № 40.*

### **Исследование влияния различных концентраций кислорода, растворенного в воде высокой температуры, на стойкость углеродистых и нержавеющей сталей**

*Руководитель работы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИИ), отв. исполнители: канд. техн. наук Е.Б. Мацкевич (ЭНИИ), инженер В.Г. Касаткина (ЭИЛ)*

Проведены стендовые испытания коррозионной стойкости сталей 1Х18Н9Т, стали 20 и стали 22К при температуре  $\sim 285^\circ\text{C}$ , давлении 100–140 атм в деаэрированной воде и в воде, содержащей 0,2–0,5 мг/кг кислорода длительностью по 1000 часов. Показано, что общая коррозия углеродистых сталей в этом случае оказывается ниже, чем коррозия нержавеющей стали в потоке деаэрированной воды тех же параметров. Обобщены результаты предыдущих работ и показано, что дальнейшее увеличение концентрации кислорода не ухудшает результатов. Полученные данные полностью совпадают с результатами аналогичных работ зарубежных авторов и доказывают, что именно кислород, а не водород, или совместное действие обоих газов,

оказывает тормозящее действие на коррозию сталей в нейтральной воде высоких параметров.

*Исследование влияния различных концентраций кислорода, растворенного в воде высокой температуры, на стойкость углеродистых и нержавеющей сталей: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ; рук. К.А. Несмеянова; исполн.: Е.Б. Мацкевич, В.Г. Касаткина. — 91 с. — М., 1968.*

### **Исследование встроенных сепараторов влаги для кипящих реакторов**

*Исполнители: инженер Е.А. Лобачёва, техник Е.И. Морозова (ЭИЛ); канд. техн. наук В.Б. Карасёв (предприятие п/я А-7291), канд. техн. наук А.Г. Агеев (ЭНИН)*

Приведены результаты исследований турбосепараторов диаметром 80,88 и 99 мм, предназначенных для разделения пароводяной смеси, применительно к энергетическим и транспортным парогенерирующим установкам. Исследования проведены на пароводяной смеси при давлении 70 ата и начальном паросодержании от 5 до 35%.

*Исследование встроенных сепараторов влаги для кипящих реакторов: отчёт о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Е.А. Лобачёва, Е.И. Морозова, В.Б. Карасёв, А.Г. Агеев. — М., 1970. — 72 с. — Инв. № 80.*

## **Работы применительно к гомогенному реактору ГР-2**

### **Исследование коррозионной стойкости титановых сплавов при рабочих параметрах реактора ГР-2**

*Руководитель темы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН); исполнители: инженеры Н.М. Александрова (ЭНИН), В.Г. Касаткина (ЭИЛ)*

Представлены результаты коррозионных испытаний титановых сплавов Т-3, Т-4 и Т-3/23 (легирован по нижнему пределу) в паровой и водной фазах раствора 10%  $H_2SO_4$  и 5%  $UO_2SO_4$  с добавками 0,05% Y- и 0,005% Вг-, а также раствора 0,5%  $H_2SO_4$  и 9%  $UO_2SO_4$  при температурах 250–300 °С (рабочих параметрах гомогенного реактора ГР-2).

*Исследование коррозионной стойкости титановых сплавов при рабочих параметрах реактора ГР-2: отчёт о НИР / ЭИЛ МСЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук. К.А. Несмеянова; исполн.: Н.М. Александрова, В.Г. Касаткина. — М., 1961. — 50 с. — Инв. № 127.*

### **Исследование процесса конденсации пара из парогазовой смеси при высоких давлениях**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; отв. исполнители: канд. техн. наук В.К. Орлов, Д.А. Лабунцов (ЭНИН), инженеры П.А. Целищев (ЭНИН), В.Д. Байнякшин, С.А. Шевякова (ЭИЛ)*

В работе приведены опытные данные по конденсации пара из парогазовой смеси высокого давления применительно к условиям работы конден-

сатора аппарата ГР-2 при давлениях от 35 до 40 атм и концентрациях газа (азот) в смеси от 0 до 12%. Исследование проведено на полномасштабной модели с пятью штатными секциями конденсатора, выполненными из стали марки 1Х18Н9Т.

*Исследование процесса конденсации пара из парогазовой смеси при высоких давлениях: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ ГУКС МЭиЭ СССР; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: В.К. Орлов, Д.А. Лабунцов, П.А. Целищев, В.Д. Байнякшин, С.А. Шевякова. — М., 1962. — 109 с. — Инв. № 137.*

### **Исследование влияния обработки трилоном Б углеродистых сталей с целью повышения их коррозионной стойкости**

*Руководитель работы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИИ); отв. исполнитель канд. техн. наук Е.Б. Мацкевич (ЭНИИ), исполнители: инженеры В.Г. Касаткина, М.Н. Литвина (ЭИЛ), лаборант Т.А. Никонова (ЭНИИ)*

Представлены результаты коррозионных испытаний углеродистых сталей в воде при температуре 300–350 °С в присутствии и отсутствии кислорода, позволившие выявить влияние обработки трилоном Б на их коррозионную устойчивость.

*Исследование влияния обработки трилоном Б углеродистых сталей с целью повышения их коррозионной стойкости: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ ГУКС МЭиЭ СССР; рук. К.А. Несмеянова; исполн. Е.Б. Мацкевич, В.Г. Касаткина, М.Н. Литвина, Т.А. Никонова. — М., 1963. — 62 с. — Инв. № 145.*

## **Работы применительно к кипящему водо-водяному реактору ТВП-4**

### **Исследование модели сепарирующих устройств кипящего реактора ТВП-4**

*Научный руководитель работы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнители: инженеры А.Г. Агеев (ЭНИИ), В.Б. Карасёв (НИИ-8), техник Е.А. Лобачёва (ЭИЛ).*

Приведены результаты экспериментальных исследований модели сепарационных устройств реактора ТВП-4 при давлениях 70, 40, 32 и 17 ата. Показано, что сочетание свободного парового объёма и жалюзийного сепаратора является рациональной схемой сепарационного устройства.

*Исследование модели сепарирующих устройств кипящего реактора ТВП-4: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, НИИ-8, ЭИЛ; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: А.Г. Агеев, В.Б. Карасёв, Е.А. Лобачёва. — М., 1965. — 58 с. — Инв. № 754.*

## **Экспериментальное исследование гидродинамики полномасштабной модели кипящего реактора ТВП-4**

*Исполнители: канд. техн. наук И.С. Дубровский (ЭНИИ), инженеры Г.Н. Кудинов, В.П. Виноградов (предприятие п/я А-788), Л.К. Тихоненко, М.П. Юдина (ЭИЛ)*

Выполнено исследование гидродинамики кипящего водо-водяного реактора на полномасштабной модели в широком диапазоне режимных параметров. Представлены полученные результаты.

*Экспериментальное исследование гидродинамики полномасштабной модели кипящего реактора ТВП-4: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я А-788, ЭИЛ ГУКС МЭиЭ; исполн.: И.С. Дубровский, Г.Н. Кудинов, В.П. Виноградов, Л.К. Тихоненко, М.П. Юдина. — М., 1966. — 184 с. — Инв. № 841.*

## **Исследование динамики головного образца встроенного циркуляционного насоса для кипящего реактора**

*Исполнители: инженеры А.Т. Ястребов, А.П. Прошутинский (ЭИЛ), А.М. Шатохин, А.А. Патрушев (предприятие п/я А-7291)*

Исследована динамика циркуляционного насоса с гидротурбинным приводом, предназначенного для работы в кипящем реакторе.

*Исследование динамики головного образца встроенного циркуляционного насоса для кипящего реактора: отчет о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291; исполн.: А.Т. Ястребов, А.П. Прошутинский, А.М. Шатохин, А.А. Патрушев. — 24 с. — М., 1967. — Инв. № 662.*

## **Работы применительно к кипящему реактору канального типа ЭГП-6**

### **Разработка головного образца струйного циркуляционного насоса для реактора ЭГП-6**

*Исполнитель инженер Н.П. Ларионов*

В работе представлены результаты экспериментального исследования модели струйного циркуляционного насоса (СЦН) для кипящего реактора канального типа.

*Разработка головного образца струйного циркуляционного насоса для реактора ЭГП-6: отчет о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго; исполн. Н.П. Ларионов. — Электрогорск, 1967. — 34 с. — Инв. № 663.*

### **Экспериментальное исследование гидродинамики двухфазного потока в элементах циркуляционного контура реактора ЭГП-6**

*Исполнители: канд. техн. наук И.С. Дубровский (ЭНИИ); инженеры М.П. Юдина, С.З. Лутовинов (ЭИЛ), Ю.Н. Боголюбов (предприятие п/я А-1854)*

Представлены результаты исследования гидродинамики двухфазного потока в элементах циркуляционного контура реактора ЭГП-6 на гидродинамической модели при давлениях 21,41 и 66 атм. Определены формы

течения и параметры двухфазного потока в горизонтальном, наклонном и вертикальном участках внешней части циркуляционного контура.

*Экспериментальное исследование гидродинамики двухфазного потока в элементах циркуляционного контура реактора ЭГП-6: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго, предприятие п/я А-1854; исполн.: И.С. Дубровский; М.П. Юдина, С.З. Лутовинов, Ю.Н. Боголюбов. — М., 1968. — 150 с. — Инв. № 844.*

## **Работы в обоснование проектных решений по реактору РБМК**

### **Испытание коррозионной стойкости нержавеющей и низколегированных сталей в воде высоких параметров различного состава (II этап — испытание в воде с добавкой кислорода)**

*Руководитель работы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИИ); исполнители: канд. техн. наук Е.Б. Мацкевич (ЭНИИ), инженеры В.Г. Касаткина (ЭИЛ)*

Представлены результаты коррозионных испытаний трёх марок низколегированных сталей и пяти марок нержавеющей сталей в потоке чистой воды, содержащей 3–5 мг/л кислорода при температуре 300 °С и давлении 140 атм. Выявлен пассивирующий эффект присутствия в воде кислорода, а именно: весовые показатели коррозии углеродистых сталей снижаются в 13–20 раз, а нержавеющей сталей снижаются в 1,1–3,5 раза при наличии в воде 3–5 мг/л кислорода по сравнению с их коррозионными показателями в деаэрированной воде (испытания были проведены ранее).

*Испытание коррозионной стойкости нержавеющей и низколегированных сталей в воде высоких параметров различного состава (II этап — испытание в воде с добавкой кислорода): отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ ГУКС ГПК по ЭиЭ СССР; рук. К.А. Несмеянова; исполн.: Е.Б. Мацкевич, В.Г. Касаткина (ЭИЛ). — М., 1964. — 44 с. — Инв. № 156.*

### **Исследование кризиса теплообмена при вынужденном движении пароводяной смеси**

*Отв. исполнители: чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин, д-р техн. наук Д.А. Лабунцов, инженер Э.И. Ливерант (ЭНИИ), Д.П. Трутнев, А.Ф. Чалых (ЭИЛ)*

Проведен общий анализ условий возникновения кризиса теплообмена для четырех основных гидродинамических режимов вынужденного движения пароводяной смеси и представлены результаты экспериментов по измерению  $q_{кр}$  при продольном обтекании трехстержневых пучков имитаторов твэлов применительно к условиям реактора РБМК при следующих условиях:  $P=80-90$  бар,  $\rho_w=1000-6500$  кг/м<sup>3</sup>·с,  $X$  до 0,7.

*Исследование кризиса теплообмена при вынужденном движении пароводяной смеси: отчёт о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ; исполн. Г.Н. Кружилин,*

*Д.А. Лабунцов, Э.И. Ливерант, Д.П. Трутнев, А.Ф. Чалых. — М., 1966. — 54 с. — Инв. № 766.*

### **Исследование динамики парообразующих каналов при ударных нагрузках и больших ускорениях**

*Руководитель работы д-р техн. наук Д.А. Лабунцов (ЭНИН); исполнители: канд. техн. наук И.П. Корнюхин, инженер Р.И. Созиев (ЭНИН), инженер А.Г. Лобачёв (ЭИЛ)*

Представлены результаты исследований теплогидродинамических процессов в условиях механических нагрузок и ускорений — при резком набросе давления, процессов конденсации пара в недогретой жидкости и скорости распространения возмущений в двухфазном потоке.

*Исследование динамики парообразующих каналов при ударных нагрузках и больших ускорениях: отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, рук. Д.А. Лабунцов; исполн.: И.П. Корнюхин, Р.И. Созиев, А.Г. Лобачёв. — М., 1967. — 29 с. — Инв. № 769.*

### **Исследование кризиса теплообмена в парогенерирующих каналах**

*Отв. исполнители: чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин, д-р техн. наук Д.А. Лабунцов, инженер Э.И. Ливерант (ЭНИН); инженер Югай Тезей*

Представлены анализ и обсуждение физических условий и закономерностей, определяющих возникновение кризиса теплообмена парогенерирующих каналов, в том числе и для канала РБМК. Изложены результаты экспериментального исследования кризиса теплообмена в трубе длиной 4,2 м при больших паросодержаниях и результаты предварительных опытов исследования  $q_{кр}$  в семистержневом пучке стержней длиной 2,2 м при давлении 70 бар.

*Исследование кризиса теплообмена в парогенерирующих каналах: отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Г.Н. Кружилин, Д.А. Лабунцов, Э.И. Ливерант; инженер Югай Тезей. — М., 1967. — 58 с. — Инв. № 301.*

### **Экспериментальное определение гидравлических характеристик канала аппарата РБМК (часть I)**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Л.А. Болотников (ЭИЛ), Б.М. Корольков (ЭНИН)*

В рамках работы осуществлена проливка макета канала РБМК водой и пароводяной смесью с различным весовым паросодержанием. Представлены полученные данные.

*Экспериментальное определение гидравлических характеристик канала аппарата РБМК (часть I): отчёт о НИР / ЭИЛ ГУ АЭС МЭиЭ СССР, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: В.Д. Байнякшин, Л.А. Болотников, Б.М. Корольков. — Электрогорск, 1968. — 30 с. — Инв. № 48.*

## **Ресурсные испытания технологического канала реактора РБМК (часть II)**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Л.А. Болотников (ЭИЛ), Б.М. Корольков (ЭНИИ)*

В рамках работы осуществлены ресурсные испытания натурной модели технологического канала и имитаторов тепловыделяющих сборок (типа I) реактора РБМК при параметрах, близких к эксплуатационным:  $P_{\text{вых.}} = 70 \text{ кг/см}^2$ ,  $x_{\text{вых.}} = 20\%$ .

*Ресурсные испытания технологического канала реактора РБМК (часть II): отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; исполн.: В.Д. Байнякшин, Л.А. Болотников, Б.М. Корольков. — М., 1968. — 92 с. — Инв. № 771.*

## **Исследование гидравлических характеристик и доработка проточной части клапана регулирующего каналов аппарата РБМК**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Л.А. Воротников (ЭИЛ); Б.М. Корольков (ЭНИИ); канд. техн. наук Р.Р. Ионайтис (НИКИЭТ)*

Получены данные по испытаниям двух одинаковых дроссельных регулирующих клапанов гребенчатого типа, предназначенных для регулирования расхода теплоносителя в канале аппарата РБМК с дроссельной шайбой и без нее на «холодной» воде и воде штатных параметров.

*Исследование гидравлических характеристик и доработка проточной части клапана регулирующего каналов аппарата РБМК: отчёт о НИР / ЭИЛ ГУАЭС МЭиЭ СССР, НИКИЭТ; исполн.: В.Д. Байнякшин, Л.А. Воротников; Б.М. Корольков, Р.Р. Ионайтис. — Электрогорск, 1968. — 41 с. — Инв. № 42.*

## **Исследование коррозионной стойкости нержавеющей и углеродистых сталей в потоках насыщенного пара и пароводяной смеси, содержащих кислород**

*Руководитель работы — канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИИ); отв. исполнители: инженеры В.И. Малышева (ЭИЛ), Н.М. Александрова (ЭНИИ)*

Представлены экспериментальные данные по коррозионной стойкости некоторых типов нержавеющей хромоникелевых сталей и стали 20 в пароводяной смеси и в насыщенном паре, содержащих кислород, при параметрах РБМК.

Показано, что наличие 20–40 мг/кг  $O_2$  в пароводяной смеси резко снижает коррозию углеродистой стали, а также несколько понижает коррозию нержавеющей стали. Наличие таких же количеств кислорода в насыщенном паре меньше сказывается на коррозионном поведении обоих типов сталей, не ухудшая их коррозионной стойкости.

*Исследование коррозионной стойкости нержавеющей и углеродистых сталей в потоках насыщенного пара и пароводяной смеси, содержащих кислород: отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук. К.А. Несмеянова; исполн.: В.И. Малышева, Н.М. Александрова. — М., 1969. — 67 с. — Инв. № 774.*

## **Исследование температурных и гидравлических процессов в зоне стыковки РЗМ и ТК при разгерметизации канала**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Л.А. Болотников (ЭИЛ), Г.В. Суругина (предприятие п/я А-7291)*

В продолжение начатого ранее исследования температурных и гидравлических режимов в зоне стыковки «холодного» варианта РЗМ с каналом РБМ-К получены данные об изменениях температур в металле стыковочного патрубка и корпуса канала после разгерметизации канала и подачи в него воды с температурой 30 °С; результаты повторных опытов по определению минимального расхода «холодной» воды, достаточного для охлаждения РЗМ и стыковочного патрубка, опытов с полной конденсацией пара в отводящем трубопроводе.

*Исследование температурных и гидравлических процессов в зоне стыковки РЗМ и ТК при разгерметизации канала: отчёт о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291; исполн.: В.Д. Байнякшин, Л.А. Болотников, Г.В. Суругина. — Электрогорск, 1969. — 85 с. — Инв. №62.*

## **Исследование влияния предварительного автоклавирования на последующую коррозию образцов-имитаторов твэлов сплавов 110 и ЭЦ-1 в потоке воды и пароводяной смеси**

*Научные руководители: канд. техн. наук А.В. Никулина (предприятие п/я Р-6575), К.А. Несмеянова (ЭНИИ); отв. исполнители: инженеры К.И. Лапина (предприятие п/я Р-6575), В.А. Гашенко (ЭИЛ); исполнители: инженеры И.В. Удалова (предприятие п/я Р-6575), Н.М. Александрова (ЭНИИ), В.Г. Касаткина (ЭИЛ)*

Исследовано влияние предварительного автоклавирования на коррозию образцов-имитаторов твэлов с оболочками из сплавов 110 и ЭЦ-11 в потоке воды и пароводяной смеси при  $t=285$  °С. Представлены полученные результаты.

*Исследование влияния предварительного автоклавирования на последующую коррозию образцов-имитаторов твэлов сплавов 110 и ЭЦ-1 в потоке воды и пароводяной смеси: отчёт о НИР / предприятие п/я Р-6575, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук.: А.В. Никулина, К.А. Несмеянова; исполн.: К.И. Лапина, В.А. Гашенко, И.В. Удалова, Н.М. Александрова, В.Г. Касаткина. — М., 1969. — 29 с. — Инв. № 816.*

## **Исследование влияния напряжений на гидрирование и ориентацию гидридов тонкостенных труб из циркониевых сплавов**

*Научные руководители: канд. техн. наук А.В. Никулина, инженер В.Н. Абрамцев (предприятие п/я Р-6575), канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИИ); отв. исполнители: инженеры М.С. Пузова, В.Д. Алексеенко (предприятие п/я Р-6575), Н.М. Александрова (ЭНИИ), В.Г. Касаткина (ЭИЛ)*

Представлены результаты исследования влияния напряжений на гидрирование и ориентацию гидридов тонкостенных труб из циркониевых

сплавов 110, ЭЦ-1, Э-635 и 125 на коррозию в воде (300 °С – 88 атм.) и паре (400 °С – 100 атм.) за время до 1000 часов.

Представлено также описание методики создания растягивающих напряжений в стенках трубчатых образцов.

*Исследование влияния напряжений на гидрирование и ориентацию гидридов тонкостенных труб из циркониевых сплавов: отчёт о НИР / предприятие п/я Р-6575, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ, рук.: А.В. Никулина, В.Н. Абрамцев, К.А. Несмеянова, М.С. Пузова, В.Д. Алексеенко, Н.М. Александрова, В.Г. Касаткина. — М., 1969. — 34 с. — Инв. № 817.*

### **Исследование коррозионной стойкости спецсплавов в воде и пароводяной смеси**

*Руководитель работы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН); отв. исполнители: инженеры В.Г. Касаткина, Г.С. Полякова (ЭИЛ), Н.М. Александрова (ЭНИН)*

В работе представлена сводка результатов коррозионных испытаний образцов-имитаторов твэлов из сплавов циркония ЭЦ-1, 110 и 512, проведенных в период с сентября 1967 г. по октябрь 1969 г. Испытания проведены в потоках воды и пароводяной смеси при температуре 285 °С и содержании кислорода, приближающемся к нормам его содержания в аналогичных средах кипящих реакторов. Цель работы заключалась в выявлении наиболее стойкого циркониевого сплава и способа предварительной обработки изделий из него, обеспечивающих высокую коррозионную стойкость твэлов в условиях работы кипящих реакторов

*Исследование коррозионной стойкости спецсплавов в воде и пароводяной смеси: отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук. К.А. Несмеянова; исполн. В.Г. Касаткина, Г.С. Полякова, Н.М. Александрова. — М., 1969. — 30 с. — Инв. № 981.*

### **Разработка струйного циркуляционного насоса для реактора типа РБМК**

*Научный руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин (ЭНИН); исполнитель инженер Н.П. Ларионов (ЭИЛ)*

Работа посвящена разработке и экспериментальной проверке работы модели струйного циркуляционного насоса для одного из проектируемых вариантов РБМК. Особое внимание уделено проверке работы насоса при наличии пара в перекачиваемой жидкости.

*Разработка струйного циркуляционного насоса для реактора типа РБМК: отчет о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго, рук. Г.Н. Кружилин; исполн. Н.П. Ларионов. — Электрогорск, 1970. — 53 с. — Инв. № 787.*

### **Экспериментальная отработка струйного термонасоса для создания принудительной циркуляции в контуре РБМ-К (результаты работы термонасоса по замкнутому контуру)**

*Руководитель темы канд. техн. наук В.Б. Карасев (предприятие п/я А-7291), исполнители: инженеры В.А. Вазингер (предприятие п/я А-7291), Е.И. Трубкин, Н.С. Куракина (ЭИЛ)*

Представлены результаты исследования работы струйного термонасоса в замкнутом циркуляционном контуре.

*Экспериментальная отработка струйного термонасоса для создания принудительной циркуляции в контуре РБМ-К (результаты работы термонасоса по замкнутому контуру): отчёт о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291; рук. В.Б. Карасев; исполн.: В.А. Вазингер, Е.И. Трубкин, Н.С. Куракина. — Электрогорск, 1970. — 16 с. — Инв. № 683.*

### **Исследование совместимости сплавов циркония и их сварных соединений с графитом в среде влажного азота**

*Научные руководители работы: д-р техн. наук И.С. Лупаков, канд. техн. наук Б.Г. Парфёнов (предприятие п/я А-7291); исполнители: инженеры Л.В. Коровина, В.А. Гашенко (ЭИЛ), Е.В. Чермашенцев, В.Н. Тюрин (предприятие п/я А-7291)*

В рамках работы на специально созданной экспериментальной установке получены предварительные результаты исследования окисления сплавов циркония и их сварных соединений в атмосфере влажного азота в контакте и без контакта с графитом при температуре 360 °С и давлении 1,2 атм.

*Исследование совместимости сплавов циркония и их сварных соединений с графитом в среде влажного азота: отчёт о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, предприятие п/я А-7291; рук.: И.С. Лупаков, Б.Г. Парфёнов; исполн.: Л.В. Коровина, В.А. Гашенко, Е.В. Чермашенцев, В.Н. Тюрин. — Электрогорск, 1970. — 93 с. — Инв. № 686.*

### **Исследование динамики коррозии конструкционных сплавов в паре, пароводяной смеси и воде**

*Научный руководитель канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН); отв. исполнители: инженеры Н.М. Александрова (ЭНИН), В.И. Малышева, Г.С. Полякова (ЭИЛ)*

Проведены коррозионные испытания сплава ЦЖМВ в потоках перегретого пара при температуре 450° и 500°С, пароводяной смеси и воды при концентрации кислорода 20–40 мг/кг.

*Исследование динамики коррозии конструкционных сплавов в паре, пароводяной смеси и воде: отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, рук. К.А. Несмеянова; исполн.: Н.М. Александрова, В.И. Малышева, Г.С. Полякова. — М., 1970. — 51 с. — Инв. № 785.*

### **Экспериментальное определение гидравлических характеристик макета технологического канала (модель 1970 г.) аппарата РБМК**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Л.А. Болотников (ЭИЛ); А.А. Любимов (ЭНИН)*

Цель работы – проведение на специальной установке гидравлических испытаний макета технологического канала аппарата РБМК с кассетой, состоящей из двух ТВС длиной по 3500 мм каждая, собранных на общем стержне, на воде и пароводяной смеси при расходах  $G=8–25$  т/ч, давлении на выходе из канала  $70$  кг/см<sup>2</sup> и расходном паросодержании  $X=0–35\%$ . Проведено сравнение сопротивлений отдельных элементов модели 1970 г. с каналом, заполненным кассетой, состоящей из 10 ТВС длиной 700 мм (модель 1968 г.).

*Экспериментальное определение гидравлических характеристик макета технологического канала (модель 1970 г.) аппарата РБМК: Отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: В.Д. Байнякшин, Л.А. Болотников; А.А. Любимов. — Электрогорск, 1970. — 35 с. — Инв. № 10.*

### **Ресурсные испытания натурной модели технологического канала реактора РБМК**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Л.А. Болотников, техник Т.М. Малафеева (ЭИЛ); инженер М.М. Местергази, канд. техн. наук Б.Г. Парфёнов, Е.Ю. Ривкин, инженеры Н.Я. Николенко, В.Н. Филиппов, М.И. Абрамов, Ю.И. Королёв, Е.В. Чермашенцев, В.Н. Гаврилов, Г.И. Сурогина, В.Д. Сизарёв, Л.А. Парфёнова (предприятие А-7291); канд. техн. наук И.С. Дубровский, А.А. Любимов (ЭНИН); канд. техн. наук В.В. Калашников, А.В. Никулина, инженер И.Б. Булдаков (предприятие п/я Р-6575)*

В рамках работы проведены длительные (около 5000 часов) испытания технологического канала и кассеты РБМК с целью проверки работоспособности отдельных узлов аппарата в условиях, близких к штатным, при этом имитировалась парозатная атмосфера снаружи канала. Работоспособность канала и кассеты проверена также в нестационарных температурных режимах (400 циклов, 800 часов испытаний) при изменении температуры воды в канале от 104 до 284 °С. Получены данные по вибрации отдельных элементов кассеты в диапазоне изменения расходов теплоносителя 10–40 т/ч и весовых паросодержаний 0,0–35,0 %.

*Ресурсные испытания натурной модели технологического канала реактора РБМК: отчёт о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291; исполн.: В.Д. Байнякшин, Л.А. Болотников, Т.М. Малафеева и др. — М., 1970. — 77 с. — Инв. № 71.*

## **Испытания встроенного циркуляционного турбонасоса с паровым приводом (малой модели)**

*Руководители работы: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко (ЭИЛ), канд. техн. наук А.Я. Крамеров (ИАЭ), канд. техн. наук И.С. Дубровский (ЭНИН); исполнители: инженеры М.П. Юдина (ЭИЛ), С.З. Лутовинов (ЭИЛ), Л.Р. Кеворков (ИАЭ), канд. техн. наук Б.А. Кольчугин (ЭНИН), инженер Д.Б. Островский (ЭНИН)*

В работе приведены результаты стендовых испытаний первого экспериментального образца встроенного циркуляционного паротурбонасоса ПТН-01. Дана оценка работы конструктивных элементов насоса. Изучены рабочие и кавитационные характеристики турбонасоса в диапазоне давлений 5–70 кг/см<sup>2</sup>. Приведены результаты опытов по поведению насоса в некоторых возможных для реактора РБМ-К нестационарных и аварийных режимах.

*Испытания встроенного циркуляционного турбонасоса с паровым приводом (малой модели): отчёт о НИР / ЭИЛ, ИАЭ им. И.В. Курчатова, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук.: Л.К. Тихоненко, А.Я. Крамеров, И.С. Дубровский; исполн. М.П. Юдина, С.З. Лутовинов, Л.Р. Кеворков, Б.А. Кольчугин, Д.Б. Островский. — Электрогорск, 1970. — 87 с. — Инв. № 14.*

## **Работы применительно к РУ специального назначения**

### **Исследование критических тепловых потоков в канале с пластинчатым закрученным ТВЭЛ**

*Руководитель работы инженер Н.П. Ларионов (ЭИЛ); исполнители: инженеры В.А. Ефимов (ЭНИН), Д.П. Трутнев, Л.Д. Трутнева (ЭИЛ)*

Излагаются результаты исследования критических тепловых потоков при кипении воды в канале, образованном круглой трубкой с помещённым в неё пластинчатым, закрученным вокруг своей оси /шнекообразным/ ТВЭЛ. Исследование проведено при следующих условиях:

- давление 70 и 1,6 ата;
- недогрев  $100 \div 0$  °С;
- весовые паросодержания  $0 \div 40\%$ ;
- весовые скорости  $120 \div 2200$  кг/м<sup>2</sup>·с

и различных геометрических характеристиках канала.

*Исследование критических тепловых потоков в канале с пластинчатым закрученным ТВЭЛ; отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ МСЭС, рук. Н.П. Ларионов; исполн.: В.А. Ефимов, Д.П. Трутнев, Л.Д. Трутнева. — М., 1962. — 52 с. — Инв. № 132.*

### **Исследование кризиса кипения в каналах кольцевого сечения**

*Руководитель работы д-р техн. наук И.Т. Аладьев (ЭНИН), исполнители: инженеры В.А. Ефимов (ЭНИН), Д.П. Трутнев, Л.Д. Трутнева (ЭИЛ)*

Представлены полученные экспериментальные данные по кризису теплоотдачи при кипении воды в каналах кольцевого сечения с односторонним и двухсторонним обогревом в зависимости от недогрева и весового паросодержания, весовой скорости и давления при коаксиальном положении трубок и различных нарушениях геометрии канала.

*Исследование кризиса кипения в каналах кольцевого сечения: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ УКС МЭиЭ СССР; рук. И.Т. Аладьев; исполн.: В.А. Ефимов, Д.П. Трутнев, Л.Д. Трутнева. — М., 1963. — 82 с. — Инв. № 143.*

### **Исследование коррозионной стойкости легированных сталей в потоке насыщенного и перегретого пара (сталь 12ХМФ в потоке перегретого пара)**

*Руководитель темы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН), исполнители: инженеры Н.М. Александрова (ЭНИН), Н.П. Сергеева, Ю.Н. Головатюк (ЭИЛ)*

Представлены результаты коррозионных испытаний стали марки 12ХМФ в потоке деаэрированного перегретого пара при температуре 510 °С и давлении 86 атм.

*Исследование коррозионной стойкости легированных сталей в потоке насыщенного и перегретого пара (сталь 12ХМФ в потоке перегретого пара): отчет о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ ГПК по ЭиЭ СССР; рук. К.А. Несмеянова; исполн.: Н.М. Александрова, Н.П. Сергеева, Ю.Н. Головатюк. — Электрогорск, 1964. — 29 с. — Инв. № 155.*

### **Кризис кипения воды при продольном обтекании пучков стержневых твэлов**

*Руководитель темы д-р техн. наук И.Т. Аладьев (ЭНИН), отв. исполнитель инженер В.А. Ефимов (ЭНИН), исполнитель инженер Д.П. Трутнев (ЭИЛ)*

Проведён подробный анализ экспериментальных исследований кризиса кипения воды в пучках стержней, включая собственные результаты исполнителей работы, что позволило установить зависимость  $q_{кр}$  от геометрических и режимных параметров.

*Кризис кипения воды при продольном обтекании пучков стержневых твэлов: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ ГПК по ЭиЭ СССР, рук. И.Т. Аладьев; исполн.: В.А. Ефимов, Д.П. Трутнев. — М., 1964. — 68 с. — Инв. № 751.*

## **Вопросы методики исследования кризиса кипения на поверхности твэлов со спиральным оребрением**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнители: инженеры Д.П. Трутнев, З.А. Максимова (ЭИЛ), В.А. Ефимов, Югай Тезей (ЭНИН)*

Проведено методическое исследование условий возникновения кризиса кипения на поверхности твэлов со спиральными рёбрами при двух способах тепловыделения: омическом тепловыделении в оболочке и тепловыделении во внутренние полости твэлов. Опытами не обнаружено влияния способа обогрева на кризис кипения.

*Вопросы методики исследования кризиса кипения на поверхности твэлов со спиральным оребрением: отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИН Г.М. Кржижановского, рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Д.П. Трутнев, З.А. Максимова, В.А. Ефимов, Югай Тезей. — М., 1965. — 43 с. — Инв. № 304.*

## **Исследование критических тепловых потоков при осевом течении воды с поперечной циркуляцией**

*Исполнители: инженеры С.Я. Рыскин, Д.П. Трутнев (ЭИЛ), Р.И. Созиев (ЭНИН), А.Н. Рябов (НИИ-8)*

Представлены экспериментальные данные по критическим тепловым потокам при осевом течении воды с поперечной циркуляцией в трубках внутренним диаметром от 4,0 до 15,0 мм.

*Исследование критических тепловых потоков при осевом течении воды с поперечной циркуляцией: отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, НИИ-8; исполн.: С.Я. Рыскин, Д.П. Трутнев, Р.И. Созиев, А.Н. Рябов. — М., 1965. — 52 с. — Инв. № 160.*

## **Исследование критических тепловых потоков в пучке труб с дистанционирующими устройствами**

*Научный руководитель работы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин (ЭНИН); исполнители: инженеры Югай Тезей (ЭНИН), Д.П. Трутнев, А.Ф. Чалых (ЭИЛ)*

Представлены экспериментальные данные по  $q_{кр}$  в пучке труб при наличии дистанционирующих устройств различного типа, полученных при следующих режимных параметрах:  $P=104\div 111$  ата,  $\rho W=710\div 4550$  кг/м<sup>2</sup>·с,  $\bar{x}=-0,26\div 0,42$ .

*Исследование критических тепловых потоков в пучке труб с дистанционирующими устройствами: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ, рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Югай Тезей, Д.П. Трутнев, А.Ф. Чалых. — М., 1966. — 57 с. — Инв. № 763.*

**Исследование условий возникновения кризиса кипения в пучке стержневых твэлов с ребристыми оболочками при наличии искусственного перемешивания воды спиральными рёбрами**

*Научный руководитель работы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнители: инженеры Д.П. Трутнев, З.А. Максимова (ЭИЛ), Югай Тезей (ЭНИН)*

В работе изложена методика приближенного определения интенсивности перемешивания, вызванного особенностями гидродинамики потока в канале с ребристыми стержневыми твэлами. По разработанной методике были проведены опыты, результаты которых, приведённые в работе, использовались при расчёте энтальпий воды в «горячей» зоне пучка ребристых стержней в экспериментах по кризису кипения воды и при оценке влияния наличия многозаходного оребрения твэлов на интенсивность перемешивания потока.

*Исследование условий возникновения кризиса кипения в пучке стержневых твэлов с ребристыми оболочками при наличии искусственного перемешивания воды спиральными рёбрами: отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Д.П. Трутнев, З.А. Максимова, Югай Тезей. — М., 1966. — 71 с. — Инв. № 293.*

**Испытания инжекторного конденсатора в замкнутом контуре с поверхностным охладителем. Часть II**

*Научный руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин (ЭНИН); исполнители: инженеры Ю.Г. Емельянов, В.Д. Байнякшин (ЭИЛ)*

Приводятся результаты продолжения испытаний натурной модели инжекторного конденсатора для установки по проекту НИИ-8.

Предложено уточнённое уравнение характеристики инжектора. Приводится сравнение опытных данных с результатами расчётов и даются рекомендации по режимным параметрам и геометрическим размерам инжекторного конденсатора.

*Испытания инжекторного конденсатора в замкнутом контуре с поверхностным охладителем. Часть II: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Ю.Г. Емельянов, В.Д. Байнякшин. — Электрогорск, 1966. — 37 с. — Инв. № 767.*

**Условия возникновения кризиса кипения воды при продольном обтекании пучков ребристых стержневых твэлов с приблизительно равноценными ячейками**

*Научный руководитель работы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнители: инженеры Д.П. Трутнев (ЭИЛ), Югай Тезей (ЭНИН)*

Получены экспериментальные данные по кризису кипения воды в пучках твэлов с дистанционирующими спиральными ребрами.

*Условия возникновения кризиса кипения воды при продольном обтекании пучков ребристых стержневых твэлов с приблизительно равноценными ячейками: отчёт*

*о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Д.П. Трутнев, Югай Тезей. — 33 с. — М., 1966, Инв. № 303.*

### **Экспериментальная отработка эффективности дистанционирующих устройств с целью повышения предельных тепловых режимных параметров в сборке стержневых ТВЭЛОВ**

*Исполнители: инженеры Д.П. Трутнев, А.Ф. Чалых (ЭИЛ), Югай Тезей (ЭНИН)*

Представлены первые результаты экспериментов по  $q_{кр}$  в трёх- и семистержневых сборках с элементами двойного назначения: дистанционирование ТВЭЛОВ и интенсификация перемешивания теплоносителя между ячейками при  $P = 49-103$  бар,  $\rho W = 300-4400$  кг/м<sup>2</sup>·с.

*Экспериментальная отработка эффективности дистанционирующих устройств с целью повышения предельных тепловых режимных параметров в сборке стержневых ТВЭЛОВ: отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Д.П. Трутнев, А.Ф. Чалых, Югай Тезей. — Электрогорск, 1967. — 114 с. — Инв. № 300.*

### **Экспериментальное исследование кризиса кипения в пучках ТВЭЛОВ специального профиля (ТВЭЛЫ с тремя тепловыделяющими ребрами) при продольном обтекании водой, недогретой до температуры насыщения, пароводяной смесью**

*Исполнители: инженеры Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, Д.П. Трутнев (ЭИЛ), Югай Тезей, Е.В. Коршунов (ЭНИН)*

Работа посвящена исследованию кризиса теплоотдачи при вынужденном течении недогретой воды и пароводяной смеси в каналах, образованных пучком имитаторов ТВЭЛОВ трехгранного профиля с равномерным по длине полем тепловыделения в диапазоне изменения режимных параметров:  $P = 31,5-176,5$  бар;  $gw = 500-4400$  кг/м<sup>2</sup>·с;  $X_{вх.} = -0,4 \dots + 0,4$ .

*Экспериментальное исследование кризиса кипения в пучках ТВЭЛОВ специального профиля (ТВЭЛЫ с тремя тепловыделяющими ребрами) при продольном обтекании водой, недогретой до температуры насыщения, пароводяной смесью: отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, Д.П. Трутнев, Югай Тезей, Е.В. Коршунов. — М., 1968. — 59 с. — Инв. № 778.*

### **Экспериментальная отработка конструктивных способов повышения предельных тепловых нагрузок**

*Научные руководители: чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин, д-р техн. наук Д.А. Лабунцов; исполнители: инженеры Е.В. Столяров, М.П. Гашенко, А.Ф. Чалых, Д.П. Трутнев (ЭИЛ), Т. Югай, Э.И. Ливерант (ЭНИН)*

Получены экспериментальные данные по  $q_{кр}$  дляборок с различными устройствами, предназначенными для повышения предельных тепловых нагрузок в диапазоне параметров энергетических реакторов типа РБМК и В-3М.

*Экспериментальная обработка конструктивных способов повышения предельных тепловых нагрузок: отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук.: Г.Н. Кружилин, Д.А. Лабунцов; исполн.: Е.В. Столяров, М.П. Гашенко, А.Ф. Чалых, Д.П. Трутнев, Т. Югай, Э.И. Ливерант. — Электрогорск, 1968 — 67 с. — Инв. № 299.*

### **Исследование гидродинамики пучка имитаторов твэлов трёхгранного профиля**

*Исполнители: инженеры А.Г. Лобачёв, А.И. Борисова*

Работа посвящена изучению истинных объёмных паросодержаний в обогреваемом 19-стержневом пучке, выполненном из стержней специального профиля.

Представлены опытные данные по полным перепадам давления пучка при давлении  $P = 31,5$  бар,  $\rho W = 300 \div 1000$  кг/м<sup>2</sup>·с,  $q$  до 0,8 МВт/м<sup>2</sup>.

*Исследование гидродинамики пучка имитаторов твэлов трёхгранного профиля: отчёт о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго; исполн.: А.Г. Лобачёв, А.И. Борисова. — Электрогорск, 1968. — 31 с. — Инв. № 675.*

### **Жаростойкость стали ЭП-450 в потоке пара с высоким содержанием кислорода**

*Руководители работы: канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН), В.П. Сентюрёв, А.М. Гришин (предприятие н/я Р-6575), инженер В.А. Гашенко (ЭИЛ); ответственные исполнители: инженеры Н.М. Александрова (ЭНИН), В.П. Демидов (предприятие н/я Р-6575), В.И. Малышева (ЭИЛ)*

В специальном стенде проведены коррозионные испытания и получены данные по стойкости стали мартенситно-ферритного класса (ЭП-450) в водяном паре с высоким (~30 мг/л) содержанием кислорода при температурах ~520 и 600 °С, давлении 110 атм, скорости потока пара ~50 м/с.

*Жаростойкость стали ЭП-450 в потоке пара с высоким содержанием кислорода: отчет о НИР / ЭИЛ, предприятие н/я Р-6575, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук.: К.А. Несмеянова, В.П. Сентюрёв, А.М. Гришин, В.А. Гашенко; исполн.: Н.М. Александрова, В.П. Демидов, В.И. Малышева. — Электрогорск, 1968. — 29 с. — Инв. № 58.*

### **Экспериментальное исследование кризиса теплоотдачи при кипении воды в пучках ТВЭЛ трёхгранного профиля с равномерным и переменным аксиальным тепловыделением**

*Исполнители: инженеры Е.В. Столяров, Д.П. Трутнев (ЭИЛ), Е.В. Коршунов (предприятие н/я Р-6575), Югай Тезей (ЭНИН)*

Представлены результаты исследования кризиса теплоотдачи при кипении воды в пучках имитаторов твэлов трёхгранного профиля при равномерном и косинусоидальном аксиальном тепловыделении в диапазоне изменения режимных параметров:  $P=31,5 \div 176,5$  бар;  $\rho W = 500 \div$

2000 кг/м<sup>2</sup>·с, относительная энтальпия на входе  $0,3 \div +0,8$ , обогреваемая длина трёхгранного профиля – 900 мм.

*Экспериментальное исследование кризиса теплоотдачи при кипении воды в пучках ТВЭЛ трёхгранного профиля с равномерным и переменным аксиальным тепловым делением: отчёт о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, предприятие п/я Р-6575, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Е.В. Столяров, Д.П. Трутнев, Е.В. Коршунов, Югай Тезей. — М., 1969. — 31 с. — Инв. № 164.*

### **Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления при закрученном течении воды**

*Исполнители — инженеры А.Ф. Чалых (ЭИЛ), А.Н. Рябов (предприятие п/я А-7291)*

Цель работы — экспериментальное исследование гидравлического сопротивления при закрученном движении воды в трубах диаметром 15,0; 8,0 и 4,0 мм при давлениях 58,8; 98 и 137 бар. Относительная длина труб изменялась от 40 до 150 калибров. Приведены опытные данные при паросодержаниях до 40 %.

*Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления при закрученном течении воды: отчет о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291; исполн.: А.Ф. Чалых, А.Н. Рябов. — Электрогорск, 1970. — 43 с. — Инв. № 677.*

### **Исследование склонности специальных марок сталей к коррозионному растрескиванию в воде высоких параметров при воздействии на них теплового потока и механических напряжений (I этап)**

*Научные руководители работы — канд. техн. наук В.Л. Богоявленский (предприятие п/я Р-6575), К.А. Несмеянова (ЭНИИ), отв. исполнитель — инженер В.А. Гашенко (ЭИЛ); исполнители: инженеры А.В. Филимонов, А.П. Шевцов (предприятие п/я Р-6575), В.И. Касаткин, Н.М. Александрова (ЭНИИ)*

Представлены результаты первого этапа исследования склонности специальных марок сталей к коррозионному растрескиванию (КР) в воде высоких параметров при воздействии на них теплового потока и механических напряжений. Приведены данные по стойкости к КР хромоникелевого сплава, находящегося под воздействием теплового потока и механического напряжения в чистой воде и в воде с хлором, полученные на специально созданном для проведения исследований экспериментальном стенде.

*Исследование склонности специальных марок сталей к коррозионному растрескиванию в воде высоких параметров при воздействии на них теплового потока и механических напряжений (I этап): отчёт о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, предприятие п/я Р-6575, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук. В.Л. Богоявленский, К.А. Несмеянова; исполн. В.А. Гашенко, А.В. Филимонов, А.П. Шевцов, В.И. Касаткин, Н.М. Александрова. — Электрогорск, 1970. — 26 с. — Инв. № 73*

### **Экспериментальное исследование гидродинамики адиабатного двухфазного потока в сборке имитаторов твэлов специального профиля**

*Исполнители: инженеры Б.М. Корольков, Е.М. Ставиский (ЭНИН), Г.Г. Круглихина (ЭИЛ)*

Представлены данные визуального наблюдения и фотографии течения воздуховодяной смеси (давление  $P = 1 \div 2$  бар) в горизонтальной трубе ( $\varnothing 15,8$  мм) и в семистержневой сборке имитаторов твэлов специального профиля при различной ориентации их в пространстве при адиабатном течении пароводяной смеси ( $P = 50$  бар,  $\rho W = 500 \div 2500$  кг/м<sup>2</sup>·с) и расходных объёмных паро(газо)-содержаниях  $\beta = 0,1 \div 0,85$ .

*Экспериментальное исследование гидродинамики адиабатного двухфазного потока в сборке имитаторов твэлов специального профиля: отчёт о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ Главатомэнерго; исполн.: Б.М. Корольков, Е.М. Ставиский, Г.Г. Круглихина. — М., 1970. — 74 с. — Инв. № 786.*

### **Отработка перспективных конструкций сепараторов пара**

#### **Исследование центробежно-пленочного сепаратора для сепарации влаги из пара в последних ступенях паровых турбин**

*Научный руководитель работы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин, исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, В.И. Белов (ЭИЛ), А.Г. Агеев (ЭНИН)*

Приведены результаты исследования центробежно-пленочного сепаратора, предназначенного для сепарации влаги из пара в последних ступенях паровых турбин, с целью определения рациональных размеров и сепарационных характеристик сепараторов данного типа при проливе их потоком воздухо-водяной смеси.

*Исследование центробежно-пленочного сепаратора для сепарации влаги из пара в последних ступенях паровых турбин: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского: рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: В.Д. Байнякшин, В.И. Белов, А.Г. Агеев. — М., 1967. — 31 с. — Инв. № 63.*

#### **«Экспериментальное исследование роторного сепаратора» — этап пробных испытаний**

*Исполнители: канд. техн. наук А.Г. Агеев (ЭНИН), В.Б. Карасев (предприятие п/я А-7291), инженер Ю.Г. Емельянов (ЭИЛ)*

Приводятся методика исследований и результаты пробных испытаний роторного сепаратора, предназначенного для осушки влажного пара.

*Экспериментальное исследование роторного сепаратора — этап пробных испытаний: отчет о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, предприятие п/я А-7291; исполн.: А.Г. Агеев, В.Б. Карасев, Ю.Г. Емельянов. — Электрогорск, 1970. — 27 с. — Инв. № 784.*

## **Работы прикладного характера по испытаниям головных образцов оборудования, спецарматуры и др.**

### **Разработка способов очистки, обезжиривания, травления и пассивации контуров АЭС из нержавеющей и углеродистых сталей**

*Руководитель темы канд. техн. наук Н.А. Несмеянова (ЭНИИ); исполнители: инженеры В.Г. Касаткина, Н.П. Сергеева (ЭИЛ)*

Цель работы – найти способы и экспериментально подобрать растворы, пригодные для промывки и очистки поверхностей первых контуров АЭС, не разрушающие графито-пластмассовые подшипники штатных бессальниковых циркуляционных насосов, а также на внутренние поверхности насосов подпитки парогенераторов со стороны второго контура, с тем, чтобы исходя из условия проведения тщательной предмонтажной подготовки и очистки всех без исключения узлов и деталей первого контура, избежать операции травления первого контура после монтажа и ограничиться только их обезжириванием.

В результате выполненной работы:

- показана нецелесообразность травления первых контуров АЭС после сварочных работ, производимых при монтаже узлов, все детали которых заранее освобождены от окисных образований;
- экспериментально подобран слабощелочной (рН=10,6–11,2) обезжиривающий раствор с высокой эмульгирующей и суспендирующей способностью, безвредный по отношению к конструкционным материалам;
- представлены рекомендации по применению в качестве травящего агента слабых растворов чистой фосфорной кислоты и её же с добавлением трилона Б.

*Разработка способов очистки, обезжиривания, травления и пассивации контуров АЭС из нержавеющей и углеродистых сталей: отчет о НИР / ЭИЛ МСЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, рук. Н.А. Несмеянова; исполн.: В.Г. Касаткина, Н.П. Сергеева. — М., 1961. — 51 с. — Инв. № 126.*

### **Испытание отключающих устройств конструкции ЦКБА**

*Руководитель работы инженер Н.П. Ларионов; исполнители: инженеры Г.Г. Шевяков, А.И. Филоненко*

Получены гидравлические характеристики отключающих устройств для Белоярской ГРЭС, изготовленных ЛМЗ по чертежам ЦКБА, в испытаниях на холодной (до 104 °С), горячей (250–290 °С) воде и слегка перегретом паре, т.е. в условиях, близких к натурным.

*Испытание отключающих устройств конструкции ЦКБА: отчет о НИР / ЭИЛ МСЭС, ЭНИИ; рук. Н.П. Ларионов; исполн.: Г.Г. Шевяков, А.И. Филоненко. — Электротрогorsk, 1962. — 37 с. — Инв. № 12.*

## **Испытание отключающих устройств АМБ–100 на паре**

*Ответственный исполнитель – инженер Л.А. Болотников*

Целью выполненной работы являлось определение работоспособности на паре штатных регулирующих вентилей с отключающими устройствами для 1-го блока Белоярской АЭС.

*Испытание отключающих устройств АМБ–100 на паре: отчет о НИР / ЭИЛ ГУКС ГПК по ЭиЭ; исполн. Л.А. Болотников. — Электрогорск, 1964. — 23 с. — Инв. № 22.*

## **Изыскание оптимальной характеристики срабатывания отключающих устройств для водяных каналов II блока БАЭС.**

### **Определение характеристик регулирующих вентилей**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Л.А. Болотников*

Экспериментально установлена оптимальная характеристика расходов срабатывания грузового клапана. Определены характеристики регулирующих вентилей отключающих устройств.

*Изыскание оптимальной характеристики срабатывания отключающих устройств для водяных каналов II блока БАЭС. Определение характеристик регулирующих вентилей: Отчет о НИР / ЭИЛ; исполн.: В.Д. Байнякшин, Л.А. Болотников. — Электрогорск, 1965. — 128 с. — Инв. № 23.*

## **Исследование работоспособности клапана Р-6562**

*Исполнители: инженеры А.П. Прошутинский, Л.В. Романова*

Получены экспериментальные расходные характеристики регулирующего клапана Р-6562 поворотного типа разработки ЦКБА, сделано заключение о его работоспособности.

*Исследование работоспособности клапана Р-6562: отчет о НИР / ЭИЛ; исполн.: А.П. Прошутинский, Л.В. Романова. — Электрогорск, 1965. — 26 с. — Инв. № 60.*

## **Испытание расходомера влажного пара**

*Исполнители: канд. техн. наук Л.Д. Бойко (ЭНИИ), инженер В.Д. Байнякшин (ЭИЛ)*

Получены экспериментальные результаты испытаний на перегретом и влажном паре двух расходомеров влажного пара при давлении 32 атм. Делается вывод о принципиальной возможности использования сопла для измерения расхода влажного пара.

*Испытание расходомера влажного пара: отчет о НИР / ЭИЛ; исполн.: Л.Д. Бойко, В.Д. Байнякшин. — Электрогорск, 1965. — 18 с. — Инв. № 660.*

## **Испытание высокоскоростных подшипников, работающих на воде**

*Исполнитель инженер И.П. Донцов*

В работе приведены результаты испытания подшипников скольжения, в которых втулка и шейка, составляющие пару, изготовлены из разных материалов.

Приводится описание стенда и специально сконструированного участка, на котором производились испытания подшипников.

*Испытание высокоскоростных подшипников, работающих на воде: отчет о НИР / ЭИЛ; исполн. инженер И.П. Донцов. — Электрогорск, 1965. 3 18 с. — Инв. № 56.*

### **Магнитно-магнетитовый способ очистки воды от окислов железа**

*Исполнители: инженеры А.А. Хохонова, Ю.Н. Головатюк*

В работе представлены описание схемы экспериментального стенда, конструкции магнитно-магнетитового фильтра (ММФ) и методики проведения исследования эффективности ММФ по очистке воды от окислов железа, а также результаты первого этапа исследований.

*Магнитно-магнетитовый способ очистки воды от окислов железа: отчет о НИР / ЭИЛ ГУКС МЭиЭ СССР; исполн.: А.А.Хохонова, Ю.Н.Головатюк. — Электрогорск, 1965. — 21 с. — Инв. № 25.*

### **Исследование работоспособности клапана Р–6562.125 с поступательно перемещающейся сборкой стакана шибера клапана D-150 типа 568-150-Э**

*Исполнитель инженер А.П. Прошутинский*

По результатам испытаний даны рекомендации по конструктивной доработке клапана Р-6562.125, определены усилия на штоке, необходимые для перемещения стакана и шибера при изменении перепада давления на канале от 0 до 70 кг/см<sup>2</sup>.

*Исследование работоспособности клапана Р–6562.125 с поступательно перемещающейся сборкой стакана шибера клапана D-150 типа 568-150-Э: отчет о НИР / ЭИЛ; исполн. А.П. Прошутинский. — Электрогорск, 1966. — 14 с. — Инв. № 57.*

### **Экспериментальная отработка дроссельных устройств для измерения весового паросодержания на выходе из технологических каналов кипящих реакторов**

*Научный руководитель работы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнители: инженеры Л.К. Тихоненко, Н.С. Куракина (ЭИЛ), Б.Г. Базанин (ЭНИН)*

Проведены испытания дроссельного измерителя паросодержания двухфазного потока — труба Вентури (при давлении 71,1 бар, в диапазоне паросодержаний 0–0,4), результаты которых подтвердили, что данное устройство может быть применено для измерения паросодержаний в технологических каналах с требуемой точностью.

*Экспериментальная отработка дроссельных устройств для измерения весового паросодержания на выходе из технологических каналов кипящих реакторов: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Л.К.Тихоненко, Н.С.Куракина, Б.Г.Базанин. — М., 1967. — 23 с. — Инв. № 43.*

## **Стендовые испытания головного образца питательного насоса ПЭ 850-65**

*Исполнители: инженеры В.И. Белов, В.Д. Байнякишин*

Проведены промышленные испытания головного образца питательного насосного агрегата типа ПЭ 850-65, предназначенного для питания парогенераторов блоков с турбиной К-22-44.

*Стендовые испытания головного образца питательного насоса ПЭ 850-65: отчет о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго; исполн.: В.И. Белов, В.Д. Байнякишин. — Электротрогорск, 1969. — 37 с. — Инв. № 63.*

## **Испытание опытной системы автономного расхолаживания кипящего реактора на экспериментальном стенде**

*Исполнители: инженеры В.М. Брук, В.И. Грачев, А.М. Шатохин, канд. техн. наук В.С. Головин (предприятие п/я А-7291), инженеры А.П. Прошутинский, А.Г. Толмачев, Г.В. Осокин (ЭИЛ)*

Целью работы являлась проверка на экспериментальном стенде работоспособности системы автономного расхолаживания (САР), предназначенной для электрогенераторной установки ВАУ-6, а также исследование теплогидравлических характеристик системы и их стабильности.

Приводятся описание САР и экспериментального стенда, а также результаты выполненных исследований.

*Испытание опытной системы автономного расхолаживания кипящего реактора на экспериментальном стенде: отчет о НИР / предприятие п/я А-7291, ЭИЛ Главатомэнерго; исполн.: В.М. Брук, В.И. Грачев, А.М. Шатохин, В.С. Головин, А.П. Прошутинский, А.Г. Толмачев, Г.В. Осокин. — М., 1970. — 105 с. — Инв. № 664.*

## **Разработка генератора гремучей смеси**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякишин, А.А. Любимов, В.Г. Касатина, А.А. Хохонова*

Приведены результаты по исследованию генератора гремучей смеси, работающего по принципу электролизера без разделительной диафрагмы в проточной обессоленной воде для различных давлений, скоростей потока и величин рН.

*Разработка генератора гремучей смеси: отчет о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, исполн.: В.Д. Байнякишин, А.А. Любимов, В.Г. Касатина, А.А. Хохонова. — Электротрогорск, 1970. — 29 с. — Инв. № 67.*

## **Работы исследовательского поискового характера в части исследования теплогидравлических процессов в элементах ЯЭУ**

### **Исследование критических тепловых потоков в каналах сложной формы**

*Руководитель темы д-р техн. наук И.Т. Аладьев (ЭНИИ);*

*исполнители: инженеры В.А. Ефимов (ЭНИИ), Д.П. Трутнев, Л.Д. Додонов, В.Н. Яшинов*

В работе дается описание стенда для изучения теплообмена и критических тепловых потоков при кипении воды в различных каналах, а также описание экспериментальной модели канала ВВЭР. Приводятся также данные предварительных опытов по влиянию дистанционирующей решетки в модели канала ВВЭР на величину критического теплового потока и место возникновения кризиса.

*Исследование критических тепловых потоков в каналах сложной формы: отчет о НИР / ЭНИИ им. Г.М.Кржижановского, ЭИЛ УДСЭиС МСЭ СССР, рук. И.Т. Аладьев; исполн.: В.А. Ефимов, Д.П. Трутнев, Л.Д. Додонов, В.Н. Яшинов. — М., 1961. — 39 с. — Инв. № 285.*

### **Исследование конденсации пара внутри горизонтальных труб парогенератора**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин (ЭНИИ);*

*ответственный исполнитель инженер Л.Д. Бойко (ЭНИИ);*

*исполнители: инженеры В.В. Карелин, Ф.И. Блюменкранц (ЭИЛ)*

Представлены результаты экспериментального исследования различных режимов конденсации пара внутри отдельных труб, разных по длине и диаметру, расположенных горизонтально для диапазона давлений 12,5-90 атм и удельных тепловых нагрузках до  $1,3 \times 10^6$  ккал/(м<sup>2</sup>·ч).

*Исследование конденсации пара внутри горизонтальных труб парогенератора: отчет о НИР / ЭНИИ им. Г.М.Кржижановского, ЭИЛ УКС МЭиЭ СССР, рук. Г.Н. Кружилин (ЭНИИ); исполн.: Л.Д. Бойко, В.В. Карелин, Ф.И. Блюменкранц. — М., 1962. — 138 с. — Инв. № 13.*

### **Экспериментальное исследование проскальзывания и распределения паросодержания на модели активной зоны**

*Исполнители: инженеры А.Г. Лобачев, В.И. Макеев*

На специальных стендах экспериментально исследована гидродинамика двухфазных потоков в обогреваемом пучке в контуре сложной формы при естественной и принудительной циркуляциях. При давлении 70 атм с помощью  $\gamma$ -просветки исследовано истинное объемное паросодержание. Приводятся полученные экспериментальные данные.

*Экспериментальное исследование проскальзывания и распределения паросодержания на модели активной зоны: отчет о НИР / ЭИЛ ГПК по ЭиЭ СССР; исполн.: А.Г. Лобачев, В.И. Макеев. — Электрогорск, 1963. 3 75 с. — Инв. № 746.*

## **Исследование конденсации пара из парогазовой смеси внутри горизонтальных труб парогенератора**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин (ЭНИН); ответственный исполнитель инженер Л.Д. Бойко (ЭНИН); исполнитель техник Г.Г. Кузнецова*

Представлены впервые полученные опытные данные по конденсации пара в горизонтальных трубах из парогазовой смеси с давлением 12,5–90 атм, весовыми газосодержаниями на входе в трубу 2,8–45 % (азот), удельными тепловыми нагрузками от  $0,198 \times 10^6$  до  $1,53 \times 10^6$  ккал/(м<sup>2</sup>·ч).

*Исследование конденсации пара из парогазовой смеси внутри горизонтальных труб парогенератора: отчет о НИР/ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛУКС ГПК по ЭиЭ; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Л.Д. Бойко, Г.Г. Кузнецова. — М., 1963. — 42 с. — Инв. № 14.*

## **Изучение теплообмена и гидравлических сопротивлений в пучках твэлов**

*Исполнители: инженеры А.В. Орлов (ЭНИН), В.И. Макеев, В.К. Орлов (ЭИЛ)*

Представлены опытные данные по теплообмену и гидравлическому сопротивлению в семитрубных циркониевых и нержавеющей пучках имитаторов твэлов, отличающихся диаметром трубок, количеством продольных витых ребер и их относительной высотой.

*Изучение теплообмена и гидравлических сопротивлений в пучках твэлов: отчет о НИР / ЭНИН им. Г.М.Кржижановского, ЭИЛ ГУКС по ЭиЭ СССР; исполн.: А.В. Орлов, В.И. Макеев, В.К. Орлов. — М., 1964. — 37 с. — Инв. № 147.*

## **Разработка экспериментальной методики и экспериментальная проверка на стендах расчетов нестационарных и стационарных режимов естественной и принудительной циркуляции в кипящих реакторах**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин (ЭНИН); исполнители: инженеры И.С. Дубровский (ЭНИН), Л.К. Тихоненко, И.А. Попов (ЭИЛ)*

Представлены результаты исследования гидродинамики циркуляционного контура модели кипящего водяного реактора со встроенными сепараторами на стационарных и нестационарных режимах при давлениях 5–90 атм и различных паровых нагрузках.

*Разработка экспериментальной методики и экспериментальная проверка на стендах расчетов нестационарных и стационарных режимов естественной и принудительной циркуляции в кипящих реакторах: отчет о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ ГУКС; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: И.С. Дубровский, Л.К. Тихоненко, И.А. Попов. — М., 1964. — 176 с. — Инв. № 151.*

## **Исследование гидродинамики двухфазных потоков в обогреваемых вертикальных каналах**

*Научный руководитель работы д-р техн. наук Д.А. Лабунцов; исполнители: инженеры Б.А. Кольчугин, И.П. Корнюхин (ЭНИН), А.Г. Лобачев (ЭИЛ)*

Получены экспериментальные данные по истинным объёмным паросодержаниям и гидравлическим сопротивлениям в обогреваемой вертикальной трубе  $d_{\text{вн.}}=34,3$  мм, длиной 1330 мм при давлении 4,9–68 бар и удельных тепловых нагрузках до  $q=2,3$  МВт/м<sup>2</sup>.

*Исследование гидродинамики двухфазных потоков в обогреваемых вертикальных каналах: отчет о НИР / ЭНИН им. Г.М.Кржижановского, ЭИЛ; рук. Д.А. Лабунцов; исполн.: Б.А. Кольчугин, И.П. Корнюхин, А.Г. Лобачев. — М., 1965. — 56 с. — Инв. № 72.*

## **Исследование коррозионной стойкости нержавеющей сталей и сплавов в перегретом паре**

*Руководитель работы канд. хим. наук В.П. Сентюрев (НИИ-9), канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН); исполнители: инженеры Ю.Н. Головатюк (ЭИЛ), А.М. Гришин (НИИ-9), Н.М. Александрова (ЭНИН)*

Представлены результаты коррозионных испытаний некоторых типов аустенитных нержавеющей сталей в потоке перегретого пара при температуре 550 °С и давлении 100 атм при скорости потока 45 м/с в течение 3000 часов.

*Исследование коррозионной стойкости нержавеющей сталей и сплавов в перегретом паре: отчет о НИР / ЭИЛ, НИИ-9, ЭНИН им. Г.М.Кржижановского, рук.: В.П. Сентюрев, К.А. Несмеянова; исполн.: Ю.Н. Головатюк, А.М. Гришин, Н.М. Александрова. — М., 1965. — 40 с. — Инв. № 163.*

## **Испытание коррозионной стойкости нержавеющей и низколегированных сталей в воде высоких параметров различного состава**

*Руководитель работы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН); ответственные исполнители: канд. техн. наук Е.Б. Мацкевич (ЭНИН), инженер В.Г.Касаткина (ЭИЛ)*

Представлены результаты коррозионных испытаний легированных и малолегированных сталей в потоках деаэрированной и кислородсодержащей ( $O_2=3-5$  мг/кг) воды высоких параметров ( $P=140$  атм,  $T=300$  °С).

*Испытание коррозионной стойкости нержавеющей и низколегированных сталей в воде высоких параметров различного состава: отчет о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Е.Б. Мацкевич, В.Г. Касаткина. — М., 1965. — 65 с. — Инв. № 761.*

### **Испытание инжекторного конденсатора в замкнутом циркуляционном контуре с поверхностным охладителем**

*Научный руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин (ЭНИН);  
исполн.: канд. техн. наук Л.Д. Бойко (ЭНИН),  
инженер В.Д. Байнякшин (ЭИЛ)*

В работе представлены экспериментальные характеристики струйного инжекторного конденсатора.

*Испытание инжекторного конденсатора в замкнутом циркуляционном контуре с поверхностным охладителем: отчет о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Л.Д. Бойко, В.Д. Байнякшин. — М., 1965. — 73 с. — Инв. № 760.*

### **Исследование процесса отложения продуктов коррозии на поверхности нагрева**

*Научный руководитель работы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН);  
исполнитель инженер Ю.Н. Головатюк (ЭИЛ)*

Проведены испытания (2166 часов) устройства, моделирующего в первом приближении процесс накипеобразования на оболочках твэлов кипящих водоохлаждаемых реакторов в условиях развитого поверхностного кипения воды при давлении  $\sim 50$  ата и  $q$  через теплопередающую трубку  $\sim 1 \cdot 10^6$  ккал/( $m^2 \cdot ч$ ). В работе представлены полученные результаты.

*Исследование процесса отложения продуктов коррозии на поверхности нагрева: отчет о НИР / ЭНИН им. Г.М.Кржижановского, ЭИЛ; рук. К.А. Несмеянова; исполн. Ю.Н. Головатюк. — М., 1965. — 33 с. — Инв. № 757.*

### **Исследование паросодержания и гидравлических сопротивлений при движении восходящего адиабатного потока в кольцевом канале**

*Руководитель работы д-р техн. наук Д.А. Лабунцов;  
исполнители: инженер А.Г. Лобачев (ЭИЛ), канд. техн. наук Б.А. Кольчугин,  
инженер И.П. Корнюхин*

Получены экспериментальные данные по паросодержаниям и гидравлическим сопротивлениям при движении восходящего адиабатного потока в кольцевом канале с эквивалентным диаметром 10,2 мм в широком диапазоне режимных параметров.

*Исследование паросодержания и гидравлических сопротивлений при движении восходящего адиабатного потока в кольцевом канале: отчет о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ; рук. Д.А. Лабунцов; исполн.: А.Г. Лобачев, Б.А. Кольчугин, И.П. Корнюхин. — М., 1966. — 46 с. — Инв. № 36.*

### **Экспериментальное исследование процесса разрушения пены при выпаривании радиоактивных вод АЭС**

*Исполнители: инженеры В.С. Головин, А.А. Любимов (ЭНИН),  
А.А. Хохонова, техник Т.Н. Герасёва (ЭИЛ)*

Представлены полученные на двух специальных экспериментальных установках (барботажная колонна и испаритель) экспериментальные дан-

ные по условиям разрушения мыльной пены при её истечении из каналов малого диаметра.

*Экспериментальное исследование процесса разрушения пены при выпаривании радиоактивных вод АЭС: отчет о НИР / ЭИЛ ГЧКС МЭиЭ, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; исполн.: В.С. Головин, А.А. Любимов, А.А. Хохонова, Т.Н. Герасёва. — М., 1966. — 91 с. — Инв. № 765.*

### **Исследование влияния кислорода на стойкость углеродистых сталей в чистой воде высоких параметров**

*Научный руководитель работы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИИ), ответственные исполнители: канд. техн. наук Е.Б. Мацкевич (ЭНИИ), инженер В.Г. Касаткина (ЭИЛ)*

Представлены результаты проведенных коррозионных испытаний углеродистой стали 3 и нержавеющей стали 1Х18Н9Т в потоке воды при температуре 300 °С и давлении 140 атм в присутствии 7–10 мг/л кислорода при скорости потока воды 0–7,5 м/с, а также в неподвижной воде комнатной температуры в присутствии кислорода. Подтвержден защитный эффект присутствия кислорода в движущейся воде при температуре 300 °С — в этих условиях углеродистая сталь по коррозионным свойствам приближается к стали нержавеющей.

*Исследование влияния кислорода на стойкость углеродистых сталей в чистой воде высоких параметров: отчет о НИР / ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ЭИЛ; рук. К.А. Несмеянова; исполн.: Е.Б. Мацкевич, В.Г. Касаткина. — М., 1966. — 50 с. — Инв. № 758.*

### **Исследование способов защиты углеродистой стали от коррозии во время простоев**

*Руководитель работы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИИ); исполнители: инженеры В.Г. Касаткина (ЭИЛ), Т.А. Никонова (ЭНИИ)*

Работа посвящена исследованию эффективности некоторых способов защиты котельного оборудования от коррозии во время длительных простоев. Получены качественные характеристики коррозии стали при различных способах ее защиты в период простоев. Показано преимущество азота в качестве защитного средства для стали 20 при длительных простоях.

*Исследование способов защиты углеродистой стали от коррозии во время простоев: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук. К.А. Несмеянова; исполн.: В.Г. Касаткина, Т.А. Никонова. — М., 1967. — 55 с. — Инв. № 768.*

### **Экспериментальное исследование гидродинамики адиабатного двухфазного потока при подъёмном и опускном движении в трубах** *Исполнитель инженер Л.К. Тихоненко*

Получены результаты экспериментального исследования гидродинамики адиабатного двухфазного потока при подъёмном и опускном движении в трубах с искусственной шероховатостью. Проведен приближённый термодинамический анализ течения и получены полуэмпирические зависимости

для расчёта величины истинного объёмного паросодержания при подъёмном и опускном движении.

*Экспериментальное исследование гидродинамики адиабатного двухфазного потока при подъёмном и опускном движении в трубах: отчет о НИР / ЭИЛ; исполн. Л.К. Тихоненко. — Электрогорск, 1968. — 70 с. — Инв. № 53.*

### **Конденсация паровых пузырей в потоке недогретой жидкости**

*Руководитель работы д-р техн. наук Д.А. Лабунцов (ЭНИИ); исполнители: канд. техн. наук И.П. Корнюхин, инженеры Р.И. Созиев, Б.Г. Базанин (ЭНИИ), Л.В. Антонова (ЭИЛ)*

Представлены опытные данные по скорости конденсации одиночных паровых пузырей в потоке недогретой жидкости в широком диапазоне режимных параметров ( $P=10-100$  бар, скорость циркуляции  $W_0=0,25-1,5$  м/с), предложена полуэмпирическая методика расчета скорости конденсации в потоке недогретой жидкости.

*Конденсация паровых пузырей в потоке недогретой жидкости: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИИ им. Г.М.Кржижановского; рук. Д.А. Лабунцов; исполн.: И.П. Корнюхин, Р.И. Созиев, Б.Г. Базанин, Л.В. Антонова. — М., 1968. — 38 с. — Инв. № 777.*

### **Экспериментальное исследование паросодержания и гидравлических сопротивлений в вертикальном кольцевом канале при раздельном и совместном обогреве труб**

*Руководитель темы д-р техн. наук Д.А. Лабунцов (ЭНИИ); исполнители: инженер А.Г. Лобачев (ЭИЛ), канд. техн. наук Б.А. Кольчугин, И.П. Корнюхин (ЭНИИ)*

Получены данные по паросодержаниям и гидравлическим сопротивлениям в вертикальном кольцевом канале при раздельном и совместном обогреве труб в диапазоне  $q=0,29-2,3$  МВт/м<sup>2</sup>.

*Экспериментальное исследование паросодержания и гидравлических сопротивлений в вертикальном кольцевом канале при раздельном и совместном обогреве труб: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИИ им. Г.М.Кржижановского; рук. Д.А. Лабунцов; исполн.: А.Г. Лобачев, канд. техн. наук Б.А. Кольчугин, И.П. Корнюхин. — М., 1968. — 122 с. — Инв. № 52.*

### **Комплексное исследование теплогидравлической обстановки в парогенерирующем канале при предельных тепловых нагрузках**

*Руководитель работы д-р техн. наук Д.А. Лабунцов (ЭНИИ); исполнители: инженер Е.В. Столяров (ЭИЛ), канд. техн. наук Б.А. Кольчугин, инженеры Э.И. Ливерант, Ю.И. Дзарасов (ЭНИИ)*

В рамках работы созданы две экспериментальные установки для комплексного исследования коэффициента теплоотдачи, гидравлического сопротивления и поведения фаз в потоке методом микрофотосъемки с экспозицией длительностью  $0,5 \cdot 10^{-6}$  с и методом измерения расходов жидкости

в ядре и пленке, а также толщины пленки. Получены фотографии картин течения при  $P=10$  бар,  $\rho W=1000$  кг/(м<sup>2</sup>·с) и  $q$  до 0,5 МВт/м<sup>2</sup> при различных паросодержаниях.

*Комплексное исследование теплогидравлической обстановки в парогенерирующем канале при предельных тепловых нагрузках: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук. Д.А. Лабунцов; исполн.: Е.В. Столяров, Б.А. Кольчугин, Э.И. Ливерант, Ю.И. Дзарасов. — Электрогорск, 1969. — 32 с. — Инв. № 76.*

### **Поисковые испытания тридцати разновидностей опытных сталей на склонность к общей и межкристаллитной коррозии**

*Руководитель работы канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН); исполнители: инженеры Н.М. Александрова (ЭНИН), В.Г. Касаткина (ЭИЛ)*

Представлены результаты первого этапа коррозионных испытаний в статических условиях (в автоклавах) тридцати разновидностей сталей, предназначенных для использования в реакторостроении.

*Поисковые испытания тридцати разновидностей опытных сталей на склонность к общей и межкристаллитной коррозии: отчет о НИР / ЭНИН им. Г.М.Кржижановского, ЭИЛ ГЧКС ГПК по ЭиЭ СССР; рук. К.А. Несмеянова; исполн.: Н.М. Александрова, В.Г. Касаткина. — М., 1969. — 22 с. — Инв. № 159.*

### **Разработка и опытная проверка метода определения влажности водяного пара с помощью проточного калориметра**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Г.Г. Кузнецова*

В рамках работы описана методика определения малой влажности водяного пара при помощи осушения пробы в калориметре проточною типа и конструкция влагомера; указываются условия оптимизации конструкции и приводятся результаты сравнительных с солевым методом опытов на примере определения характеристик сепаратора. Делается вывод о пригодности предложенного метода для определения влажности от 0,05 до 0,8 % в энергетических установках.

*Разработка и опытная проверка метода определения влажности водяного пара с помощью проточного калориметра: отчет о НИР / ЭИЛ; исполн.: В.Д. Байнякшин, Г.Г. Кузнецова. — Электрогорск, 1969. — 53 с. — Инв. № 59.*

### **Исследование гидродинамики двухфазного потока при подъёмном и опускном движении в трубах**

*Руководитель темы д-р техн. наук Д.А. Лабунцов; ответственные исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачев, инженер Г.Г. Круглихина (ЭИЛ), канд. техн. наук Б.А. Кольчугин, инженер Э.А. Захарова (ЭНИН)*

Исследованы истинные объёмные паросодержания и гидравлические сопротивления для подъёмного и опускного движения в трубе с внутренним диаметром 12,1 мм. Диапазон исследованных режимных параметров:  $P=19,6-98$  бар, скорость циркуляции  $W_0=0,5-4,0$  м/с, удельные тепловые нагрузки  $q=0-1,4$  МВт/м<sup>2</sup> и относительные энтальпии потока  $\Delta_i/\gamma$  до 0,43.

*Исследование гидродинамики двухфазного потока при подъёмном и опускном движении в трубах: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, рук. Д.А. Лабунцов; исполн.: А.Г. Лобачев, Г.Г. Круглихина, Б.А. Кольчугин, Э.А. Захарова. — М., 1970. — 74 с. — Инв. № 79.*

**Истинное паросодержание двухфазного адиабатного потока при подъёмном движении в вертикальных каналах различной формы**

*Исполнитель инженер Л.К. Тихоненко*

Целью настоящей работы является:

1. Выяснение особенностей и общего в закономерностях изменения  $j$  для каналов малого и большого эквивалентного диаметра.
2. Обобщение доступной опытной информации по истинному паросодержанию для каналов малого эквивалентного диаметра на основе известных методов или формул.

Проведен анализ известных опытных данных, включая данные, полученные исполнителем по истинному паросодержанию адиабатного двухфазного потока в вертикальных трубах малого диаметра, кольцевых и стержневых каналах. Предложена формула для расчета истинного паросодержания в таких каналах, описывающая опытные данные с точностью  $\Delta\varphi = \pm 0,05$ .

*Истинное паросодержание двухфазного адиабатного потока при подъёмном движении в вертикальных каналах различной формы: отчет о НИР / ЭИЛ Главтомяэнерго МЭиЭ СССР; исполн. Л.К. Тихоненко. — Электрогорск, 1970. — 85 с. — Инв. № 65.*

# НИОКР ЭИЛ–ЭНИЦ 1971–1980 гг.

## Работы применительно к ВВЭР

### **Экспериментальное исследование элементов сепарационной схемы парогенератора ПГВ-1000**

*Руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин (ЭНИН); отв. исполнители: канд. техн. наук А.Г. Агеев, И.С. Дубровский, П.А. Целищев (ЭНИН); исполнители: инженер В.И. Гришанов (ЭНИН), канд. техн. наук В.Г. Желтов (ЭНИН), инженер Е.А. Лобачева (ЭИЛ), инженеры Д.Б. Островский, В.И. Петухов (ЭНИН)*

Задачей работы являлось проведение экспериментального исследования гравитационной сепарации влаги в свободном объеме и гидродинамики двухфазного потока в моделях циркуляционного контура с погруженным дырчатым щитом при различных схемах циркуляции и давлении 3 и 64 атм. Получены сепарационные характеристики свободного объема, распределение истинного объемного паро-воздухосодержания в подъемном и опускном участках контура, а также в районе погруженного дырчатого щита.

*Экспериментальное исследование элементов сепарационной схемы парогенератора ПГВ-1000: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М.Кржижановского; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: А.Г. Агеев, И.С. Дубровский, П.А. Целищев и др. — М., 1971. — 90 с. — Инв. № 13.*

### **Экспериментальное исследование на моделях теплогидравлических характеристик при стационарных режимах и аварийном снижении расхода теплоносителя применительно к реакторам типа ВВЭР**

*Исполнители: канд. техн. наук А.П. Прошутинский, инженеры М.П. Гашенко, Т.В. Карпова (ЭИЛ), инженер Югай Тезей, канд. техн. наук И.С. Дубровский*

Экспериментально исследован кризис теплоотдачи на семистержневой сборке при стационарных режимах и аварийном снижении расхода теплоносителя. Проведено экспериментальное исследование распределения расходов в параллельных каналах с имитацией косинусоидального тепловыделения по длине обогреваемых каналов при аварийном снижении расхода теплоносителя. Установлено, что закономерности кризиса теплоотдачи в сборке стержней и распределения расходов в параллельных каналах при стационарных режимах и аварийном снижении расхода теплоносителя значительно отличаются друг от друга.

*Экспериментальное исследование на моделях теплогидравлических характеристик при стационарных режимах и аварийном снижении расхода теплоносителя применительно к реакторам типа ВВЭР: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: А.П. Прошутинский, М.П. Гашенко, Т.В. Карпова и др. — М., 1971. — 130 с. — Инв. № 290.*

### **Экспериментальное исследование гидродинамики и температурного режима в пучках имитаторов твэлов применительно к ВВЭР**

*Руководитель темы д-р техн. наук Д.А. Лабунцов (ЭНИН);  
исполнители: инженеры В.Л. Мухачев, Ж.С. Струневская (ЭИЛ),  
Б.М. Корольков*

Получены опытные данные по истинным объёмным паросодержаниям и температурному режиму работы имитаторов твэлов ВВЭР в двух семистерженевых пучках с равноценными и неравноценными в теплогидравлическом отношении ячейками (зонами) поперечного сечения пучка в широком диапазоне изменения режимных параметров (давление  $P=50-125$  бар,  $\rho_w=500-2000$  кг/м<sup>2</sup>·с,  $q=0,4-1,2$  МВт/м<sup>2</sup>).

*Экспериментальное исследование гидродинамики и температурного режима в пучках имитаторов твэлов применительно к ВВЭР: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук. Д.А. Лабунцов; исполн.: В.Л. Мухачев, Ж.С. Струневская, Б.М. Корольков. — Электрогорск, 1972. — 94 с. — Инв. № 295.*

### **Исследование коррозионной стойкости оребренных труб пароперегревателя СПП-220**

*Руководитель темы д-р техн. наук К.А. Несмеянова; отв. исполнитель инженер М.И. Савельева (ЭИЛ); исполнитель В.И. Касаткин (ЭНИН)*

Проведены коррозионные исследования оребренных труб пароперегревателя СПП-220 в перегретом паре при температуре 200 °С, давлении 4 ата (автоклавные испытания) и в условиях, имитирующих простояные периоды эксплуатации пароперегревателя ( $T \sim 20$  °С, атмосферное давление, 100% относительная влажность воздуха). Показано, что оребренные трубки, обработанные в 10% растворе моноэтаноламина (МЭА), менее подвержены ржавлению в простояные периоды, чем образцы, обработанные в потоке СО<sub>2</sub>. Щелевая коррозия в местах приварки рёбер к телу трубки за время испытаний не отмечена при обоих видах предварительной обработки образцов.

*Исследование коррозионной стойкости оребренных труб пароперегревателя СПП-220: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук. К.А. Несмеянова; исполн.: М.И. Савельева, В.И. Касаткин. — Электрогорск, 1972. — 31 с. — Инв. № 86.*

### **Анализ влияния теплогидравлической неравноценности ячеек кассет реактора В-3М НВАЭС на условия кризиса теплоотдачи**

*Руководитель темы д-р техн. наук Д.А. Лабунцов (ЭНИН);  
отв. исполнители: инженер М.П. Гашенко (ЭИЛ), канд. техн. наук  
В.А. Ефимов (ЭНИН)*

В работе дается математическая формулировка задачи определения скорости и энтальпии теплоносителя в ячейках сборок тепловыделяющих стержней и запаса до кризиса теплоотдачи. Предлагается методика упрощенных решений с последующим их анализом.

На первом этапе работы выполнены приближенные расчеты без учета теплообмена между ячейками применительно к аппарату В-3М Нововоронежской АЭС. В результате выявлена степень теплогидравлической неравноценности ячеек топливной кассеты и ее влияние на запас до кризиса теплоотдачи.

Отмечается, что полученные результаты показывают, что в конструкции кассеты заложены возможности некоторого повышения ее предельной мощности по условию кризиса теплоотдачи в стационарном режиме работы. При этом необходимо уточнение поля тепловыделения по сечению кассеты.

*Анализ влияния теплогидравлической неравноценности ячеек кассет реактора В-3М НВАЭС на условия кризиса теплоотдачи: отчет о НИР/ЭИЛ Главатомэнерго, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук. Д.А. Лабунцов; исполн.: М.П. Гашенко, В.А. Ефимов. — Электрогорск, 1973. — 44 с. — Инв. № 294.*

### **Разработка эластичной перегородки для герметизации помещений АЭС**

*Отв. исполнитель инженер О.Ш. Шапиев;*

*исполнители: канд. техн. наук А.Ю. Дыхно, инженер А.Т. Ястребов*

Представлена разработанная конструкция и технология изготовления фторопластовой эластичной перегородки для герметизации проёмов ГЦЭН и ГЗЗ с ВВЭР-440.

*Разработка эластичной перегородки для герметизации помещений АЭС: отчет о НИР/ЭИЛ; исполн.: О.Ш. Шапиев, А.Ю. Дыхно, А.Т. Ястребов. — Электрогорск, 1974. — 56 с. — Инв. № 108.*

### **Система локализации аварий на АЭС с реакторами ВВЭР-440 с применением «сухих» конденсаторов**

*Руководитель работ д-р физ.-мат. наук Д.Л. Бродер; отв. исполнители:*

*д-р физ.-мат. наук Д.Л. Бродер, канд. техн. наук В.Н. Майданик, В.А. Силин, В.К. Шанин, инженер В.И. Шмелев, канд. техн. наук А.П. Прошутинский; исполнители: канд. техн. наук В.И. Гайдуков, И.В. Гордеева, инженеры В.А. Беляев, В.П. Лозгачев, П.Н. Митраков, А.И. Купоросов, В.А. Сивобород, Ю.А. Фаворин, С.В. Цветков, С.И. Якушова, техник А.А. Авдеев (НПО «Энергия»), инженер А.Г. Толмачев (ЭИЛ)*

Представлены результаты, полученные на специально сооружённых стендах, которыми подтверждена правильность выбора ряда расчетных параметров «сухих» конденсаторов, представляющих собой коробки с засыпкой из керамических колец Рашига, в частности выбор величин эффективного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{эф.}}$ , величины гидравлического сопротивления засыпки из колец Рашига, отношения объёма воздушной ловушки к объёму всей системы локализации. Предложено использование «сухих» конденсаторов для вариантов системы локализации с организованным выбросом части паровоздушной смеси в атмосферу и с защитной оболочкой. Отмечается,

что материально-экономический расчет подтверждает экономическую целесообразность создания такой системы.

*Система локализации аварий на АЭС с реакторами ВВЭР-440 с применением «сухих» конденсаторов: отчет о НИР/НПО «Энергия»; рук. Д.Л. Бродер; исполн.: Д.Л. Бродер, В.Н. Майданик, В.А. Силин и др. — М., 1975. — 105 с. — Инв. № 39.*

### **Исследование коррозионной стойкости конструкционных материалов I-го контура реактора ВВЭР в растворах борной кислоты с добавлением щелочей и кислорода**

*Отв. исполнители: инженер В.Г. Касаткина (ЭИЛ), инженер В.И. Касаткин (ЭНИН), исполнители: инженер А.А. Хохонова (ЭИЛ), лаборант Т.А. Никонова (ЭНИН)*

Приведены результаты исследования коррозионной стойкости конструкционных материалов I-го контура реакторов ВВЭР (стали, сплавы циркония с 1% и 2,5% Nb) в потоках растворов борной кислоты с добавками щелочей (KOH, LiOH, NH<sub>3</sub>), водорода и кислорода при температуре ~280 °С, давлении 125 кгс/см<sup>2</sup> и скорости потока ~0; ~3; ~6 м/с.

Показано, что все испытанные стали корродируют в деаэрированных растворах борной кислоты с добавками водорода и щелочей более интенсивно, чем в растворах борной кислоты с добавками кислорода, водорода и щелочей. Интенсивность окисления сплавов циркония в растворах борной кислоты с добавками кислорода, водорода и щелочей выше, чем в тех же растворах, но деаэрированных.

Полученные данные дают возможность оценить влияние природы щелочной добавки (K<sup>+</sup> или Li<sup>+</sup>) на коррозионную стойкость сталей и циркониевых сплавов в кислородосодержащих и деаэрированных растворах борной кислоты.

*Исследование коррозионной стойкости конструкционных материалов I контура реактора ВВЭР в растворах борной кислоты с добавлением щелочей и кислорода: отчет о НИР/ЭИЛ Главатомэнерго, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: В.Г. Касаткина, В.И. Касаткин, А.А. Хохонова, Т.А. Никонова. — Электрогорск, 1975. — 53 с. — Инв. № 41.*

### **Исследование коррозионной стойкости сварных соединений из сплава циркония с 1% и 2,5% Nb в растворах борной кислоты с добавками щелочей и кислорода**

*Отв. исполнители: инженер В.Г. Касаткина (ЭИЛ), инженеры В.И. Касаткин, Н.М. Александрова (ЭНИН), инженеры М.И. Плышевский, Л.Т. Руденская (предприятие п/я А-7291); исполнители: инженер А.А. Хохонова (ЭИЛ), лаборант Т.И. Никонова (ЭНИН), инженеры А.Г. Носов, А.Н. Семенов, А.Н. Сидоров, В.Г. Царьков (предприятие п/я А-7291)*

Цель работы — проведение исследований коррозионной стойкости сварных соединений из сплава циркония с 1% и 2,5% Nb, выполненных электроннолучевой и аргонодуговой сваркой, в потоке растворов борной

кислоты с добавками щелочей, водорода и кислорода при температуре 285–300 °С давлением 125 кгс/см<sup>2</sup>.

*Исследование коррозионной стойкости сварных соединений из сплава циркония с 1% и 2,5% Nb в растворах борной кислоты с добавками щелочей и кислорода: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М.Кржижановского, предприятие п/я А-7291; исполн.: В.Г. Касаткина, А.А. Хохонова, В.И. Касаткин и др. — Электрогорск, 1975. — 55 с. — Инв. № 38.*

### **Экспериментальное исследование аварийных режимов при разрыве трубопроводов на АЭС**

*Исполнители: канд. техн. наук А.П. Прошутинский, инженер А.Г. Толмачёв (ЭНИС), канд. техн. наук В.Н. Майданик, инженеры Л.Н. Митраков, Ю.А. Фаворин (НПО «Энергия»)*

Представлены результаты экспериментального исследования нестационарного истечения недогретой и насыщенной воды из напорного баллона в диапазоне начальных температур 200–300 °С с исследованием процесса конденсации насыщенного пара, образующегося при истечении, в приёмном барабане и на «сухих» конденсаторах — керамических кольцах Рашига.

Приводятся также результаты измерений и расчёта коэффициента теплопередачи к керамическим кольцам.

*Экспериментальное исследование аварийных режимов при разрыве трубопроводов на АЭС: отчёт о НИР / ЭНИС, НПО «Энергия»; исполн.: А.П. Прошутинский, А.Г. Толмачёв, В.Н. Майданик и др. — Электрогорск, 1976. — 60 с. — Инв. № 148.*

### **Экспериментальное исследование аварийных режимов при разрыве трубопроводов на АЭС**

*Исполнители: канд. техн. наук А.П. Прошутинский, инженер А.Г. Толмачев (ЭНИС), канд. техн. наук В.Н. Майданик, инженеры Л.Н. Митраков, Ю.А. Фаворин (НПО «Энергия»)*

Приведены результаты экспериментальной работы по исследованию нестационарного истечения недогретой воды из напорного баллона объемом 80 л в приемную емкость 3,4 м<sup>3</sup> (барабан) в диапазоне начальных температур 200–300 °С, диаметрах патрубка истечения 6, 10, 15 мм и длиной 318 мм. Опыты по истечению проводились из трех различных по высоте напорного баллона патрубков истечения. В опытах измерялись изменения во времени давления, температуры в напорном баллоне и в барабане, вес баллона, а также исследовался процесс конденсации пара в барабане, оснащённом «сухими» конденсаторами — керамическими кольцами Рашига. Предложена расчетная методика определения изменения давления в барабане, проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными, дан общий анализ полученных экспериментальных данных.

*Экспериментальное исследование аварийных режимов при разрыве трубопроводов на АЭС: отчет о НИР / НПО «Энергия»; исполн.: А.П. Прошутинский, А.Г. Толмачев, В.Н. Майданик и др. — М., 1977. — 94 с. — Инв. № 158.*

### **Экспериментальная отработка элементов системы локализации аварий с использованием струйных конденсаторов**

*Исполнители: канд. техн. наук Б.К. Кудрявцев (НПО «Энергия»), инженер А.Г. Толмачев (ЭНИС)*

Представлены результаты экспериментальной работы по исследованию пусковых характеристик конденсационного инжектора. Исследования проводились при давлении сухого насыщенного пара и охлаждающей жидкости на входе в инжектор  $0,1 \div 0,25$  МПа, температуре охлаждающей воды  $3 \div 30$  °С, максимальном расходе пара  $G_n = 1200$  кг/ч, максимальном расходе охлаждающей жидкости  $G_{ж} = 32$  тн/ч и коэффициентах инжекции  $u_{сопла} = 8 \div 40$ . Исследовано влияние сечения горла диффузора и жидкостного сопла на характеристику инжектора и выбран оптимальный диаметр горла диффузора, равный 25 мм для исследованных диаметров горл 20, 25, 30 и 35 мм.

Показано, что наличие воздуха в камере смешения ухудшает пусковые характеристики инжектора, однако, инжектор запускается при меньших давлениях, чем заданное (0,25 МПа).

Приведена расчетная методика определения давления смеси на выходе из инжектора.

*Экспериментальная отработка элементов системы локализации аварий с использованием струйных конденсаторов: отчет о НИР/ НПО «Энергия», исполн.: Б.К. Кудрявцев, А.Г. Толмачев. — Электроторгск, 1978. — 55 с. — Инв. № 3.169.*

### **Экспериментальное изучение коррозионной стойкости конструкционных материалов в растворах борной кислоты в статических условиях**

*Отв. исполнители: инженеры О.Н. Абакумова, М.И. Савельева (ЭНИС), канд. техн. наук Е.Б. Мацкевич, А.Г. Агеев (ЭНИИ)*

Представлены результаты испытаний двухслойных образцов (сталь ЭИ-898/сталь 48ТС-2) напряжённых и ненапряжённых в деаэрированных и кислородсодержащих водных растворах борной кислоты в статических условиях. Расчётная величина растягивающих механических напряжений в образцах соответствовала величине напряжений, возникающих в стенке корпуса действующего реактора ВВЭР-1000 за счёт избыточного внутреннего давления теплоносителя. Термические напряжения на границе раздела основного металла и плакировки во время пуска и останова реактора имитировали циклическими нагревами коррозионных сред с погруженными в них образцами до температуры  $285 \pm 5$  °С при давлении 11,8 МПа и охлаждением их до температуры 25–60 °С.

На поверхности стали 48ТС-2 напряжённых образцов как в кислородном, так и бескислородном режимах отмечены локальные (питтинги, язвы, раковины) коррозионные разрушения, наибольшее число которых сосредоточено вдоль границы раздела двух металлов.

На поверхности напряжённых образцов стали 48ТС-2 в деаэрированной среде локальные коррозионные разрушения развиваются в этих условиях как вдоль границы двух сталей, так и на всей остальной поверхности образца.

Коррозионного растрескивания и других локальных коррозионных разрушений плакирующего из стали ЭИ-898 слоя напряжённых и ненапряжённых образцов не выявлено.

*Экспериментальное изучение коррозионной стойкости конструкционных материалов в растворах борной кислоты в статических условиях: отчёт о НИР / ЭНИС НПО «Энергия», ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; исполн.: О.Н. Абакумова, М.И. Савельева, Е.Б. Мацкевич, А.Г. Агеев. — Электрогорск, 1978. — 44 с. — Инв. № 6.178.*

### **Экспериментальное изучение коррозионной стойкости конструкционных материалов при различных стояночных режимах применительно к условиям 1-го контура ВВЭР**

*Отв. исполнители: инженеры О.Н. Абакумова, И.Н. Горячкин (ЭНИС), канд. техн. наук Е.Б. Мацкевич (ЭНИИ)*

Представлены результаты коррозионных испытаний конструкционных сталей марок 1X18H10T, 48ТС-2, ВК-4, 22К, 20 в потоке раствора борной кислоты с добавками аммиака и гидроокиси калия при параметрах эксплуатации I контура реактора ВВЭР ( $P \sim 12,0$  МПа,  $t = 285^\circ\text{C}$ ), а также в стояночных условиях.

На образцах стали ВК-4 изучено кроме того влияние трёхкратного воздействия стояночных условий на защитные свойства окисной плёнки, формирующейся на стали при испытаниях её в потоке.

Выявлены условия стояночных режимов, не снижающие защитных свойств, формирующихся на сталях окисных плёнок.

Установлено отрицательное влияние увеличения числа стоянок на защитные свойства окисных плёнок, формирующихся на стали ВК-4 в некоторых из исследованных режимов.

Показано, что наилучший из исследованных режимов консервации сталей в условиях стоянки — это выдержка при слитом теплоносителе в атмосфере инертного газа (азота). Аммиачный раствор ( $\geq 100$  мм/л) в условиях стоянки предохраняет окисную плёнку от разрушения и защищает металл от интенсивной коррозии только после одно-двукратной выдержки в этих условиях. После третьей выдержки в стояночных условиях образцы стали ВК-4 в стендовых условиях (в потоке) подвергаются усиленной коррозии.

*Экспериментальное изучение коррозионной стойкости конструкционных материалов при различных стояночных режимах применительно к условиям 1-го контура ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИС НПО «Энергия», ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, исполн.: О.Н. Абакумова, И.Н. Горячкин, Е.Б. Мацкевич. — Электрогорск, 1978. — 60 с. — Инв. № 6.182.*

**Экспериментальное изучение коррозионной стойкости  
конструкционных материалов при различных стояночных режимах  
применительно к условиям первого контура ВВЭР**

*Руководители работы: инженер В.А. Гашенко (ЭНИС),  
канд. техн. наук И.С. Дубровский (ЭНИИ),*

*отв. исполнители: инженеры О.Н. Абакумова, И.Н. Горячкин (ЭНИС)*

Проведены коррозионные испытания конструкционных сталей марок 1Х18Н10Т, 48ТС-2, ВК-4, 22К, 20 в потоке раствора борной кислоты с добавками аммиака и гидроокиси калия при параметрах эксплуатации первого контура реактора ВВЭР ( $P \sim 12,0$  МПа,  $T = 285$  °С), а также в стояночных условиях. Выявлены условия стояночных режимов, не снижающие защитных свойств оксидной пленки, формирующейся на стали при испытаниях её в потоке.

*Экспериментальное изучение коррозионной стойкости конструкционных материалов при различных стояночных режимах применительно к условиям первого контура ВВЭР: отчет о НИР / ЭНИС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук.: В.А. Гашенко, И.С. Дубровский; исполн.: О.Н. Абакумова, И.Н. Горячкин. — Электротгорск, 1978. — 60 с. — Инв. № 6.182.*

**Работы применительно к реактору АМБ-II,  
Белоярская АЭС им. И.В.Курчатова**

**Статистическое и детерминированное исследование динамики  
паросодержания в парогенерирующих каналах»**

*Исполнители: инженеры А.П. Прошутинский, А.Г. Толмачёв (ЭИЛ),  
инженер Б.Н. Селивёрстов (предприятие п/я А-7291)*

Работа посвящена экспериментальному исследованию границ устойчивости системы парогенерирующей канал-шунт на специально созданной установке. Представлены предварительные результаты экспериментального исследования границ устойчивости системы парогенерирующей канал-шунт и описание опытов по определению частотных характеристик по каналам – тепловая нагрузка парогенерирующего канала – параметр. Отмечается, что в работе особое внимание уделено описанию средств математической обработки статистических процессов с помощью аналого-цифровых вычислительных средств, позволяющих оперативно обрабатывать экспериментальную статистическую информацию.

*Статистическое и детерминированное исследование динамики паросодержания в парогенерирующих каналах: отчёт о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291; исполн.: А.П. Прошутинский, А.Г. Толмачёв, Б.Н. Селивёрстов. — М., 1971. — 70 с. — Инв. № 81.*

### **Экспериментальное исследование гидравлических характеристик фильтра для тракта ИК с интенсификатором**

*Исполнители: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко, инженеры Н.С. Куракина, Е.И. Трубкин*

Работа посвящена исследованию гидравлических характеристик отвода пароводяной смеси из испарительных каналов со встроенным фильтром (по чертежу Белоярской АЭС) при давлениях 40 и 85 кг/см<sup>2</sup>, расходах пароводяной смеси 500–4500 кг/м<sup>2</sup>·с и массовом паросодержании  $x=0-0,4$ . Показано, что с точки зрения возможности плавного изменения расхода при выходе из испарительного канала в режим кипения применение отвода предложенной конструкции допустимо.

*Экспериментальное исследование гидравлических характеристик фильтра для тракта ИК с интенсификатором: отчёт о НИР / ЭИЛ; исполн.: Л.К. Тихоненко, Н.С. Куракина, Е.И. Трубкин. — Электрогорск, 1972. — 28 с. — Инв. № 87.*

### **Экспериментальное исследование критических тепловых нагрузок труб с внутренними спиральными рёбрами и поперечными гофрами**

*Руководитель темы д-р техн. наук Д.А. Лабунцов; исполнители: инженер Р.И. Созиев (ЭНИН), инженеры Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, Н.А. Коняхина (ЭИЛ)*

Проведено экспериментальное исследование  $q_{кр}$  при подъёмном течении пароводяной смеси [ $P=40-155$  кгс/см<sup>2</sup>,  $\rho_w=500-3300$  кг/(м<sup>2</sup>·с)] в трубах без интенсификаторов и с интенсификаторами теплообмена в виде поперечных гофр внутреннего спирального оребрения. Выполненное исследование ориентировано на определение возможности повышения мощности испарительных каналов АМБ-II второго блока Белоярской АЭС им. И.В. Курчатова.

*Экспериментальное исследование критических тепловых нагрузок труб с внутренними спиральными рёбрами и поперечными гофрами: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук. Д.А. Лабунцов; исполн.: Р.И. Созиев, Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, Н.А. Коняхина. — Электрогорск, 1972. — 45 с. — Инв. № 795.*

### **Испытание укороченных макетов экспериментальных испарительных каналов АМБ ИКЦ в потоке пароводяной смеси и газовой среде графитовой кладки при температуре 350 °С**

*Руководители темы: инженер В.А. Гашенко (ЭИЛ), канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН), д-р техн. наук О.А. Шатская, канд. техн. наук Б.Г. Парфенов; отв. исполнители: инженеры Л.А. Коровина (ЭИЛ); Н.М. Александрова (ЭНИН); канд. техн. наук Г.П. Шевелев, Н.Я. Николенко, инженер В.Н. Тюрин (предприятие п/я А-7291); исполнители от предприятие п/я А-7291: М.И. Плышевский, А.Л. Бубликов, Э.М. Можарова, И.Н. Базлова, И.И. Акимов*

В специально созданном стенде проведены испытания укороченных макетов экспериментальных каналов (внутренняя поверхность) АМБ и ИКЦ

из сплавов циркония 125, Э-635 в потоке пароводяной смеси ( $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 170\text{ атм}$ ), содержащей 20–30 мг/кг кислорода; внешняя поверхность каналов испытывалась в газовой среде сложного состава в контакте с графитом ( $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=1,2\text{ атм}$ ). Параллельно с исследованием коррозионной стойкости сплавов циркония 125, Э-635 проводилось изучение радиальной ползучести этих сплавов.\*

*Испытание укороченных макетов экспериментальных испарительных каналов АМБ ИКЦ в потоке пароводяной смеси и газовой среде графитовой кладки при температуре 350 °С»: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М.Кржижановского, предприятия п/я А-7291; рук.: В.А. Гашенко, К.А. Несмеянова, О.А. Шатская и др.; исполн.: Л.А. Коровина, Н.М. Александрова, Г.П. Шевелев и др.. — Электрогорск, 1972. — 49 с. — Инв. № 92.*

### **Экспериментальное исследование теплогидравлической устойчивости испарительных каналов реакторов АМБ-II с интенсификаторами теплообмена**

*Исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачев, А.П. Прошутинский (ЭИЛ), инженер Э.И. Ливерант*

Представлены результаты исследования границ устойчивости режимов испарительных каналов с гладкими трубчатыми имитаторами твэлов с кольцевыми интенсификаторами теплообмена в широком диапазоне изменения режимных параметров ( $P = 25\text{--}140\text{ бар}$ ,  $G = 500\text{--}5000\text{ кг/ч}$ , мощность канала 20–1000 кВт, температура на входе в канал 20–( $t_s - 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

*«Экспериментальное исследование теплогидравлической устойчивости испарительных каналов реакторов АМБ-II с интенсификаторами теплообмена: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М.Кржижановского; исполн. А.Г. Лобачев, А.П. Прошутинский, Э.И. Ливерант. — Электрогорск, 1973. — 121 с. — Инв. № 797.*

### **Исследование влияния железоокисных отложений на надёжность работы испарительных каналов реакторов АМБ. Влияние отложений на работу гладкотрубного испарительного канала**

*Отв. исполнитель инженер А.Т. Ястребов; исполнитель канд. техн. наук А.Ю. Дыхно*

Исследовался процесс образования железоокисных отложений и их влияние на работу испарительного канала. Исследование проведено в специальном стенде на вертикальной гладкой трубе диаметром 12×0,6 мм, длиной 6,0 м со ступенчатым обогревом и включенной в прямоточную схему стенда. Параметры режимов:  $P = 100\text{ кгс/см}^2$ ;  $T_{\text{вх.}} = 285\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho_w = 2100\text{--}2200\text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ ;  $X_{\text{вых.}} = 0,27$ ;  $q_{\text{сп.}} = 0,5\text{ МВт/м}^2$ . Выполнено два ресурсных пробега длительностью 456 и 1106 часов при концентрациях железа в потоке 0,19 и 0,32 мг/кг соответственно и рН 8–9. Оксиды железа в контурной воде стенда по химическому и фракционному составу были близки к таковым в реальном теплоносителе и генерировались путём растворения анода из стали 3 в специально сконструированном и изготовленном электролизере, включён-

ном в схему экспериментального стенда. Образовавшиеся отложения на 80% состояли из оксидов железа (магнетита и гематита). Структура отложений капиллярно-пористая с легкосмываемым рыхлым слоем. На величину  $q_{кр}$  влияния отложений не обнаружено.

*Исследование влияния железистых отложений на надёжность работы испарительных каналов реакторов АМБ. Влияние отложений на работу гладкотрубного испарительного канала: отчет о НИР/ЭИЛ; исполн.: А.Т. Ястребов, А.Ю. Дыхно. — Электрогорск, 1974. — 103 с. — Инв. № 115.*

### **Исследование гидродинамики равновесных и неравновесных двухфазных потоков в элементах канала АМБ с интенсификаторами теплообмена**

*Руководители работы: канд. техн. наук А.Г. Лобачев (ЭИЛ), И.С. Дубровский (ЭНИИ); отв. исполнители: инженеры Г.Г. Басова, А.И. Борисова (ЭИЛ), канд. техн. наук Э.А. Захарова, инженер Р.В. Васильева (ЭНИИ)*

Получены опытные данные по величинам истинных объёмных паросодержаний и гидравлических сопротивлений при подъёмном движении неравновесного двухфазного потока в обогреваемых гладкой и гофрированной трубах внутренним диаметром 10,8 мм. Исследование выполнено в следующем диапазоне режимных параметров: давление (Р) 20, 70 и 100 бар; скорость циркуляции ( $W_0$ ) 1 и 4 м/с;  $q=0,6; 1,2$  МВт/м<sup>2</sup>;  $\Delta t/\Gamma = 0,140-0,075$ . Получены опытные данные по температурным режимам в гофрированной трубе в условиях конвективного теплообмена и кипения с недогревом.

*Исследование гидродинамики равновесных и неравновесных двухфазных потоков в элементах канала АМБ с интенсификаторами теплообмена: отчет о НИР/ЭИЛ, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук.: А.Г. Лобачев, И.С. Дубровский; исполн.: Г.Г. Басова, А.И. Борисова, Э.А. Захарова, Р.В. Васильева. — Электрогорск, 1975. — 70 с. — Инв. № 144.*

### **Исследование областей устойчивости и надежной работы испарительного канала реактора АМБ-II с интенсификаторами теплообмена типа поперечный гофр ( $\Delta=0,5$ мм; $h=25$ мм)**

*Исполнители: канд. техн. наук А.П. Прошутинский, А.Г. Лобачев, инженер Л.В. Романова (ЭНИС НПО «Энергия»); инженеры Э.И. Ливерант, И.В. Елкин (ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского)*

Представлены экспериментальные данные по теплогидравлической устойчивости полномасштабной модели пятитвэльного испарительного канала реактора АМБ-II с интенсификаторами теплообмена типа поперечный гофр.  $\Delta=0,5$  мм,  $h=25$  мм в диапазоне измерения режимных параметров: давления — 3,0–14,0 Мпа; расхода — 450–3000 кг/ч; температуры на входе —  $100-(t_s-10)$  °С; тепловой мощности — 15–835 кВт.

Исследовано и показано влияние режимных параметров на границы теплогидравлической устойчивости и на характеристики автоколебаний.

По результатам выполненного теоретического анализа влияния на устойчивость числа параллельно включенных ветвей, сделан вывод о независимости теплогидравлической устойчивости канала от числа параллельно работающих ветвей при их идентичности.

*Исследование областей устойчивости и надежности работы испарительного канала реактора АМБ-II с интенсификаторами теплообмена типа поперечный гофр ( $\Delta=0,5$  мм;  $h=25$  мм): отчет о НИР / НПО «Энергия», ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: А.П. Прошутинский, А.Г. Лобачев, Л.В. Романова, Э.И. Ливерант, И.В. Елкин. — М., 1976. — 121 с. — Инв. № 801.*

### **Испытание укороченных макетов экспериментальных испарительных каналов АМБ ИКЦ в потоке пароводяной смеси и газовой среде графитовой кладки при температуре 350 °С**

*Исполнители: инженеры В.А. Гашенко, И.Н. Горячкин (ЭНИС НПО «Энергия»); инженер Н.М. Александрова (ЭНИН), инженеры И.И. Акимов, Э.В. Можарова, Н.Я. Николенко, М.И. Плышевский, Н.Е. Рассошкина, Л.Т. Руденская, В.Н. Тюрин, Л.П. Федорович, Г.Н. Шевелев (предприятие н/я А-7291)*

В работе отмечается, что для исследования коррозионной стойкости, наводороживания и радиальной ползучести укороченных макетов экспериментальных испарительных каналов из сплавов циркония марки 125 и Э-635 проведены испытания на стенде, имитирующем специфические условия работы конструкционных материалов в теплоносителе и графитовой кладке водографитовых реакторов.

Параллельно проведены испытания образцов сварных соединений, сваренных электронно-лучевой сваркой (ЭЛ) из сплава циркония марки Э-125 в потоке пароводяной смеси. После окончания испытаний макеты и сварные образцы подвергли металлографическим исследованиям. Привольются данные о кинетике окисления сварных образцов, описание и фотографии внешнего вида макетов и сварных образцов после испытаний.

*Испытание укороченных макетов экспериментальных испарительных каналов АМБ ИКЦ в потоке пароводяной смеси и газовой среде графитовой кладки при температуре 350 °С: отчет о НИР / НПО «Энергия», ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, предприятие н/я А-7291; исполн.: В.А. Гашенко, И.Н. Горячкин, Н.М. Александрова и др. — М., 1977. — 128 с. — Инв. № 47.*

## **Исследование работы натурального пароперегревательного канала БАЭС в пароводяном и водяном режимах**

*Исполнители: канд. техн. наук А.П. Прошутинский, А.Г. Лобачев, инженер Л.В. Романова*

Проведено экспериментальное исследование разверки расходов и теплового режима стенок натурной модели пятитвального пароперегревательного канала (ППК) БАЭС им И.В. Курчатова с имитаторами твэлов диаметром  $16 \times 0,7$  мм при работе в режимах, имитирующих условия в реакторе перед продувкой канала паром в следующем диапазоне изменения режимных параметров:  $P=3,0-12,0$  МПа, мощность канала  $25-180$  кВт,  $G=400-2000$  кг/час, температура теплоносителя на входе ( $T_{\text{вх}}$ )  $100-300$  °С,  $T$  пара на выходе из канала — до  $570$  °С. Исследовано влияние основных режимных параметров на границы разверки расходов в опускных ветвях ППК. Выполнен теоретический анализ устойчивости ППК при его работе в режиме испарительного. Получен экспериментальный материал по гидравлическим характеристикам ППК и его элементов при паровом режиме работы.

*Исследование работы натурального пароперегревательного канала БАЭС в пароводяном и водяном режимах: отчет о НИР / НПО «Энергия», ЭНИС; исполн.: А.П. Прошутинский, А.Г. Лобачев, Л.В. Романова. — Электрогорск, 1977. — 126 с. — Инв. № 161.*

## **Исследование теплогидравлического режима натурального макета пароперегревательного канала БАЭС при отсутствии принудительной циркуляции теплоносителя**

*Отв. исполнители: инженеры Г.Г. Басова, Л.В. Романова (ЭНИС), инженер В.Г. Захаров; исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачев, А.П. Прошутинский*

В работе представлены результаты экспериментального исследования теплогидравлического режима натурной модели пятитвального пароперегревательного канала БАЭС им. И.В. Курчатова с имитаторами твэл  $d$   $16 \times 0,7$  при отсутствии принудительной циркуляции теплоносителя. Опыты проведены в следующем диапазоне изменения режимных параметров:

- исходная температура воды в канале  $60$  °С;
- подводимая электрическая мощность —  $2,9 \div 13,7$  кВт;
- давление на входе в канал —  $0,5 \div 1,0$  кг/см<sup>2</sup>;
- начальный уровень воды в канале  $2,6 \div 12,6$  м.

Исследовано влияние основных режимных параметров и схемы подключения канала к сбросной емкости на процесс кипения теплоносителя в канале. Показано существование двух качественно различных теплогидравлических режимов: режима периодического парообразования и режима перегрева стенок имитаторов.

Установлена зависимость воспринимаемой теплоносителем мощности в режимах кипения от подводимой к каналу электрической нагрузки, определены критические значения этих мощностей.

*Исследование теплогидравлического режима натурального макета пароперегревательного канала БАЭС при отсутствии принудительной циркуляции теплоносителя: отчет о НИР / ЭНИС НПО «Энергия, БАЭС им. И.В. Курчатова; исполн.: Г.Г. Басова, Л.В. Романова, В.Г. Захаров и др. — Электрогорск, 1978. — 172 с. — Инв. № 3-4.*

**Исследование пусковых, эксплуатационных и аварийных режимов новых типов технологических каналов реактора АМБ. Часть I. Определение предельных мощностей испарительного канала с интенсификатором теплообмена типа «винтовой гофр»**

*Исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачёв, А.П. Прошутинский, инженеры Г.Г. Басова, Л.В. Романова*

Представлены результаты экспериментального исследования теплогидравлической устойчивости полномасштабной модели пятитвэльного канала реактора АМБ-II с интенсификатором теплообмена типа «винтовой гофр» в диапазоне изменений режимных параметров: давления  $P=3,0 \div 14,0$  МПа; тепловой мощности  $N_k=14 \div 835$  кВт ( $q=0,0137 \div 0,82$  МВт/м<sup>2</sup>), расхода  $G_k=200 \div 4000$  кг/ч; температуры на входе в канал  $100 \div (t_s - 5)$  °С. Исследовано влияние режимных параметров на границы теплогидравлической устойчивости и на характеристики автоколебаний, обнаружено качественное соответствие с данными для пятитвэльного канала с поперечными гофрами и шеститвэльного канала. Исследованный тип канала позволяет значительно повысить мощность и паросодержание на выходе канала по сравнению с гладкотрубным.

Представлен экспериментальный материал по исследованию гидравлического сопротивления элементов канала.

Подтверждена принципиальная возможность работы испарительного канала в прямоточном режиме. Исследовано влияние теплогидравлической неидентичности и числа подъёмных ветвей на теплогидравлическую устойчивость канала.

*Исследование пусковых, эксплуатационных и аварийных режимов новых типов технологических каналов реактора АМБ. Часть I. Определение предельных мощностей испарительного канала с интенсификатором теплообмена типа «винтовой гофр»: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; исполн.: А.Г. Лобачёв, А.П. Прошутинский, Г.Г. Басова, Л.В. Романова. — Электрогорск, 1979. — 102 с. — Инв. № 3-4, 192, II часть.*

## **Программа расчёта устойчивости парогенерирующих каналов на ЭВМ**

*Исполнители: канд. техн. наук А.В. Некрасов, И.М. Романовский (НПО «Энергия»), канд. техн. наук А.П. Прошутинский, инженеры Н.Н. Трофимова, А.А. Шелягина*

Разработана методика расчета границ гидродинамической устойчивости работы параллельных парогенерирующих каналов, основанная на математической теории устойчивости применительно к установке БН-350.

*Программа расчёта устойчивости парогенерирующих каналов на ЭВМ: отчет о НИР / НПО «Энергия»; исполн.: А.В. Некрасов, И.М. Романовский, А.П. Прошутинский и др. — М., 1979. — 40 с. — Инв. № 186.*

## **Аналитический расчет на ЭВМ аperiodической устойчивости опускного движения теплоносителя в канале**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.П. Прошутинский, отв. исполнитель инженер Н.Н. Трофимова*

Разработана методика расчета границ аperiodической устойчивости опускного движения теплоносителя в пароперегревательном канале (ППК) с неравномерным профилем тепловыделения по высоте обогреваемого участка. Разработана программа расчета на алгоритмическом языке Фортран IV для ЭВМ типа ЕС.

*Аналитический расчет на ЭВМ аperiodической устойчивости опускного движения теплоносителя в канале: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. А.П. Прошутинский; исполн. Н.Н. Трофимова. — Электрогорск, 1980. — 45 с. — Инв. № 3.198.*

## **Работы в обоснование проектных решений по реакторам типа РБМК [РБМК-1000 (1500,2000, РБМ-КП-2400)]**

### **Ресурсные испытания натурной модели технологического канала реактора РБМК**

*Отв. исполнители: инженеры М.И. Абрамов, В.Н. Гаврилов, Г.И. Гусаров, М.М. Местергази, Н.Я. Николенко, А.А. Парфенова, Г.И. Сурогина, В.Д. Сизарев, В.Н. Филиппов, Е.В. Чермашенцев, канд. техн. наук Е.Ю. Ривкин (предприятие п/я А-7291), инженеры В.Д. Байнякшин, Л.А. Болотников, техник Т.М. Молафеева (ЭИЛ), канд. техн. наук И.С. Дубровский, А.А. Любимов (ЭНИН)*

Проведен завершающий этап длительных (9520 часов) ресурсных испытаний натурной модели канала и кассеты реактора РБМК в стационарном режиме с имитацией штатных параметров теплоносителя, режимов его движения и газовой среды, окружающей канал, а также в режиме «термокачек».

*Ресурсные испытания натурной модели технологического канала реактора РБМК: отчет о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: М.И. Абрамов, В.Н. Гаврилов, Г.И. Гусаров и др. — М.—Электрогорск, 1971. — 75 с. — Инв. № 76.*

## **Исследование коррозионной стойкости циркониевых сплавов в перегретом паре**

*Руководители работы: инженер В.А. Гашенко (ЭИЛ), канд. техн. наук Б.Г. Парфенов (предприятие п/я А-7291), канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН); отв. исполнители: инженер В.И. Малышева (ЭИЛ), инженер Л.Т. Руденская (предприятие п/я А-7291), инженер Н.М. Александрова (ЭНИН)*

Проведены испытания (~3000 часов) различных сплавов циркония в потоках перегретого пара при температурах 400, 450 и 500 °С.

*Исследование коррозионной стойкости циркониевых сплавов в перегретом паре (экспериментальные данные): отчет о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291, ЭНИН им. Г.М.Кржижановского; рук.: В.А. Гашенко, Б.Г. Парфенов, К.А. Несмеянова; исполн.: В.И. Малышева, Л.Т. Руденская, Н.М. Александрова. — Электрогорск, 1971. — 183 с. — Инв. № 75.*

## **Экспериментальная отработка способов повышения мощности испарительных каналов реактора РБМК**

*Отв. исполнители: инженеры А.Ф. Чалых, Е.В. Столяров (ЭИЛ), Т. Югай (ЭНИН), Т.И. Благовестов, А.Н. Рябов, В.Г. Сидоров, В.Н. Филиппов (предприятие п/я А-7291)*

Изложены результаты экспериментального исследования кризиса теплоотдачи при кипении пароводяной смеси в 19-стержневой сборке из трубок  $d=13,62 \times 0,2$  длиной 1100 мм, расположенных по треугольной и квадратной разбивке с шагом 16 мм в трубе  $d=79$  мм. Центральная трубка не обогревалась. Для интенсификации теплоотдачи по длине пучка с шагом 175 мм установлено 7 дистанционирующих решеток «ячеистого типа» с отгибами. Эксперименты проведены при давлении 58,8 и 74 бар, массовой скорости 1000 и 1500 кг/м<sup>2</sup>·с и массовом паросодержании на выходе  $0,45 \div 0,85$ .

*Экспериментальная отработка способов повышения мощности испарительных каналов реактора РБМК: отчет о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я А-7291; исполн.: А.Ф. Чалых, Е.В. Столяров, Т. Югай и др. — Электрогорск, 1973. — 53 с. — Инв. № 95.*

## **Экспериментальное исследование модели блок-сепаратора**

*Отв. исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Е.А. Лобачёва (ЭИЛ), канд. техн. наук В.Б. Карасёв, инженер В.К. Сафонов (предприятие п/я А-7291), инженер В.Б. Проклов (предприятие п/я А-1758); канд. техн. наук А.Г. Агеев, И.С. Дубровский (ЭНИН)*

В работе приведены результаты исследования макета вертикального сепаратора со встроенными осевыми сепараторами и турбонасосом, предназначенного для использования в сепарационной системе реактора РБМК-2000.

Исследования макета сепаратора проведены на пароводяной смеси при давлении 50, 70, 90 кс/см<sup>2</sup> в интервале изменения начального паросодержания от 10 до 25 %.

*Экспериментальное исследование модели блок-сепаратора: отчёт о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, предприятие п/я А-7291, предприятие п/я А-1758, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: В.Д. Байнякин, Е.А. Лобачёва, В.Б. Карасёв и др. — М.—Электрогорск, 1974. — 51 с. — Инв. № 24.*

## **Исследование эффективности посадочных уплотнений элементов сепаратора РБМ-КП. Часть I**

*Отв. исполнители: инженер Г.В. Осокин (ЭИЛ), инженер Н.А. Ахапкин (предприятие п/я А-7291)*

В работе дано описание экспериментальной установки для исследования работы уплотнительного узла сепаратора РБМ-КП на модели с посадочным диаметром 66 мм.

Приведены опытные данные по величинам расходов и массовых паросодержаний утечек пароводяной смеси через уплотнительные узлы, выполненные в виде гладкой кольцевой щели с радиальными зазорами 0,26 и 0,47 мм и лабиринтной щели с зазором 0,47 мм. Данные получены для опускного движения потока утечек при давлении  $P=70$  ата в диапазоне скоростей циркуляции основного потока 1,6—4,9 м/с и массового паросодержания 7—40 %.

Даны рекомендации по расчёту параметров потока утечек через гладкие кольцевые щели при конструктивном выполнении уплотнительного узла, подобном исследованному.

*Исследование эффективности посадочных уплотнений элементов сепаратора РБМ-КП. Часть I: отчёт о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, предприятие п/я А-7291; исполн.: Г.В. Осокин, Н.А. Ахапкин. — Электрогорск, 1974. — 57 с. — Инв. № 28.*

## **Экспериментальная отработка способов повышения мощности испарительных каналов реакторов РБМК**

*Руководители темы: инженер В.И. Михан (предприятие п/я А-7291); отв. исполнители: инженеры А.Ф. Чалых, Е.В. Столяров, З.А. Максимова (ЭИЛ), Т. Югай (ЭНИН), А.Н. Рябов, Т.И. Благовестова, А.И. Емельянов, В.М. Мандражицкий, В.Н. Филиппов*

Экспериментально исследован кризис теплоотдачи при кипении пароводяной смеси в 19-стержневой сборке из трубок диаметром  $13,62 \times 0,2$ , длиной 1100 мм, расположенных по треугольной и квадратной разбивке с шагом 16 мм в трубе диаметром 79 мм. Центральная трубка не обогревалась. Для интенсификации теплоотдачи по длине пучка установлено 7 дистанционирующих решеток «ячеистого» типа с отгибами. Эксперименты проведены при давлении 58,8 и 74 бар, массовой скорости 1000 и 1500 кг/(м<sup>2</sup>·с) и массовом паросодержании на выходе 0,45—0,85.

*Экспериментальная отработка способов повышения мощности испарительных каналов реакторов РБМК: отчет о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291, ЭНИН*

*им. Г.М.Кржижановского; рук. В.И. Михан; исполн.: А.Ф. Чалых, Е.В. Столяров, З.А. Максимова и др. — М.—Электрогорск, 1974. — 53 с. — Инв. № 105.*

### **Экспериментальная отработка сепарирующих устройств для реактора типа РБМК**

*Отв. исполнители: инженер В.И. Белов (ЭИЛ), канд. техн. наук В.Б. Карасев (предприятие п/я А-7291), инженер В.Б. Проклов (предприятие п/я А-1758), канд. техн. наук А.Г. Агеев, И.С. Дубровский*

Проведены исследования центробежных сепараторов диаметром 88 и 154 мм с осевым подводом потока, предназначенных для использования в парогенерирующих установках АЭС, в частности применительно к блочному варианту сепарационной схемы реактора РБМК-2000. Исследования проведены на пароводяной смеси при давлении 70 ата и начальном паросодержании от 5 до 30%.

*Экспериментальная отработка сепарирующих устройств для реактора типа РБМК: отчет о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291, предприятие п/я А-1758, ЭНИИ им. Г.М.Кржижановского; исполн.: В.И. Белов, В.Б. Карасев, В.Б. Проклов и др. — М., 1974. — 73 с. — Инв. № 23.*

### **Результаты исследования накопления неконденсирующихся газов в застойной полости макета канала реактора РБМК на стенде в ЭИЛ**

*Исполнители: инженеры М.И. Рябов (предприятие п/я А-7291), Л.А. Болотников (ЭИЛ), А.А. Любимов (ЭНИИ)*

Проведены стендовые исследования гремучей смеси — неконденсирующихся радиолитических газов (кислород и водород) в верхней части технологического канала реактора РБМК выше патрубка отвода пароводяной смеси. Выявлены факторы, влияющие на накопление гремучей смеси в данной полости. Показано, что в условиях, имитирующих эксплуатационные, в исследованном диапазоне паросодержания  $4\% < x < 21\%$ , накопление неконденсирующихся газов не достигает опасного уровня.

*Результаты исследования накопления неконденсирующихся газов в застойной полости макета канала реактора РБМК на стенде в ЭИЛ: отчет о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291; исполн.: М.И. Рябов, Л.А. Болотников, А.А. Любимов. — М., 1974. — 22 с. — Инв. № 109.*

### **Экспериментальное исследование тепло- и массопереноса в сборках твэл с геометрией реактора РБМК**

*Научный руководитель темы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; отв. исполнители: инженер В.А. Мухачев (ЭИЛ), инженер Е.В. Сакович (предприятие п/я А-7291), канд. техн. наук В.А. Ефимов, инженер Б.М. Корольков (ЭНИИ)*

Экспериментально исследован турбулентный поперечный массоперенос в двухъячеечной модели канала реактора РБМК при течении газовой потока. Получены опытные данные при массовых скоростях ( $w$ ) 500, 1000, 2000 и 4000 кг/(м<sup>2</sup>·с) и объёмных газосодержаниях ( $\beta$ ) 0 и 0,35–0,84.

*Экспериментальное исследование тепло- и массопереноса в сборках твэл с геометрией реактора РБМК: отчет о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291, ЭНИИ им. Г.М.Кржижановского; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: В.А. Мухачев, Е.В. Сакович, В.А. Ефимов, Б.М. Корольков. — М.—Электрогорск, 1975. — 39 с. — Инв. № 130.*

## **Исследование эффективности посадочных уплотнений элементов сепаратора РБМК-КП. Часть II**

*Отв. исполнители: инженер Г.В. Осокин (ЭИЛ), канд. техн. наук И.С. Дубровский (ЭНИИ), инженер В.К. Сафонов (предприятие п/я А-7291)*

В работе изложены результаты экспериментального исследования утечек пароводяной смеси через модели уплотнений узла разъёмного соединения подводящего патрубка и патрубка камеры смешения блок-сепаратора реактора РБМК-2000. Исследовано 9 вариантов уплотнений с кольцевыми щелями при осесимметричном и эксцентричном расположении моделей патрубков, торцевом и радиальном расположении входа в уплотнительную щель. На одном из вариантов уплотнения с эксцентричным расположением моделей патрубков исследовано устройство (осевой завихритель) для снижения утечки пара. Данные получены для подъёмного движения потока утечек в следующем диапазоне изменения режимных параметров: давление  $P = 30, 50, 70$  ата; скорость пароводяной смеси  $4 \div 30$  м/с; массовое расходное паросодержание 16, 30 и 40 %; перепад давления на уплотнении  $(0,05 \div 0,6)$  кг/см<sup>2</sup>.

Получены характеристики уплотнений по утечке пара и воды. Показано влияние на утечку пара и воды радиального зазора, взаимного расположения патрубков и направления потока утечки в щели. Отмечается, что применение осевого завихрителя существенно снижает утечку пара через уплотнение.

*Исследование эффективности посадочных уплотнений элементов сепаратора РБМК-КП. Часть II: отчёт о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, ЭНИИ им. Г.М.Кржижановского, предприятие п/я А-7291; исполн.: Г.В. Осокин, И.С. Дубровский, В.К. Сафонов. — Электрогорск, 1975. — 80 с. — Инв. № 40.*

## **Экспериментальная отработка способов повышения мощности испарительных каналов реактора РБМК**

*Отв. исполнители: инженеры А.Ф. Чалых, Е.В. Столяров (ЭИЛ), инженер Т. Югай (ЭНИИ), канд. техн. наук А.Н. Рябов, инженеры Т.И. Благовестова, А.И. Емельянов, В.Н. Мандражицкий, В.Н. Филиппов*

Изложены результаты экспериментального исследования кризиса теплоотдачи при течении пароводяной смеси в 19-и стержневой сборке из трубок  $\varnothing 13,6 \times 0,2$  и  $\varnothing 13,5 \times 0,2$  мм длиной 1100 мм, расположенных по треугольной и квадратной разбивке с шагом 16 мм в трубе диаметром 80 мм. Центральная труба  $\varnothing 15$  мм не обогревалась. В опытах использовались различные дистанционирующие решетки — интенсификаторы. Опыты проведены при давлении 74 бар, массовых скоростях 1000, 1500, 1750 и 2000 кг/м<sup>2</sup>·с, массовых паросодержаниях на выходе 0,33–0,80 и плотностях теплового потока до 0,84 МВт/м<sup>2</sup>.

Представлены также опытные данные по гидравлическому сопротивлению при изотермическом течении воды в диапазоне чисел  $Re$  от  $4 \times 10^3$  до  $1,7 \times 10^5$ .

Дистанционирующие решетки устанавливались с шагом от 80 мм до 206 мм.

*Экспериментальная отработка способов повышения мощности испарительных каналов реактора РБМК: отчет о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я А-7291, исполн.: А.Ф. Чалых, Е.В. Столяров, Т. Югай и др. — М. — Электрогорск, 1975. — 54 с. — Инв. № 154.*

### **Отработка элементов жалюзийного сепаратора**

*Исполнители: инженеры В.И. Белов, В.Д. Байнякшин (ЭИЛ), канд. техн. наук А.Г. Агеев (ЭНИИ), инженер А.Г. Мончинский, канд. техн. наук В.Б. Карасев, инженер В.К. Сафонов (предприятие п/я А-7291)*

Приведены результаты экспериментального исследования схемы сепарации, состоящей из предвключенного парового объема в сочетании с вертикальными жалюзийными сепараторами различных конструкций. Исследования проведены при давлении 70 ата и частично 50 и 30 ата.

Установлено сохранение пропорциональности между высотой парового объема и его допустимой нагрузкой вплоть до высоты 700 мм. Приведенная скорость пара при этом в условиях равномерной нагрузки зеркала испарения составляет 0,7 м/с (давление 70 ата, конечная влажность 0,1 %).

Показано, что жалюзийные сепараторы высотой 730 мм всех испытанных конструкций, отличающихся числом секций, шагом и глубиной жалюзи, практически равноценны. Ухудшение работы жалюзийных сепараторов в исследованном интервале нагрузок происходит вследствие приближения уровня пароводяной смеси к нижней кромке жалюзи и подтопления сепараторов.

*Отработка элементов жалюзийного сепаратора: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я А-7291; исполн.: В.И. Белов, В.Д. Байнякшин, А.Г. Агеев и др. — Электрогорск, 1975. — 96 с. — Инв. № 139.*

### **Исследование влияния состава сложной газовой среды на окисление и наводороживание сплавов циркония и их сварных соединений**

*Исполнители: инженеры В.А. Гашенко, И.Н. Горячкин (НПО «Энергия»), инженеры В.Н. Тюрин, Е.В. Чермашенцев, М.И. Плышевский, И.И. Акимов, А.Н. Семенов*

Представлены результаты исследования влияния состава сложных газовых сред, состоящих из смеси азота, гелия, либо азота и гелия (в качестве основы) с парами воды и продуктами реакции воды с раскаленным графитом на стойкость сплавов циркония марки 110, 125, Э-635 и их сварных соединений против окисления и наводороживания. В специальном стенде испытывались образцы, изготовленные из штатных труб и прошедшие предварительную термо- и термомеханическую обработку.

*Исследование влияния состава сложной газовой среды на окисление и наводороживание сплавов циркония и их сварных соединений: отчет о НИР / НПО «Энергия», предприятие п/я А-7291; исполн.: В.А. Гашенко, И.Н. Горячкин, В.Н. Тюрин и др. — М., 1976. — 140 с. — Инв. № 6.167.*

## **Исследование распределения влажности по высоте парового объема**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, В.И. Белов*

В работе приведены результаты исследования распределения влажности по высоте парового объема в условиях барботажа при давлении 70 кгс/см<sup>2</sup>, приведенных скоростях пара от 0,1 до 1,3 м/с и весовых уровнях от –50 до 560 мм.

Отмечается, что исследования проведены на барботажных колонках конического и цилиндрического профиля, причем, в профиле конической колонки была смоделирована эпюра скоростей по высоте парового объема реального аппарата. В процессе проведения исследований отработаны: метод отбора пробы, осредненной за время опыта, метод непрерывного контроля солесодержания в пробах пара и котловой воды и система подвижных пробоотборников для отбора проб из парового объема.

Проведено обобщение результатов распределения влажности в паровом объеме цилиндрической и конической колонок при скоростях пара 0,29–0,8 м/с и весовых уровнях 80–300 мм и показано отсутствие качественного различия в распределении влаги при скоростях 0,3 и 0,8 м/с.

Показано, что в паровом объеме выше конца переходной зоны, определенной по измерениям влажности, отсутствует существенный вынос транспортируемой влаги и гравитационная сепарация позволяет получать сухой пар (с влажностью менее 0,1 %) при надлежащем выборе конструктивного пространства до скоростей пара 1,3 м/с.

*Исследование распределения влажности по высоте парового объема: отчет о НИР / ЭНИС, НПО «Энергия», исполн.: В.Д. Байнякшин, В.И. Белов. — Электрoгoрск, 1976. — 60 с. — Инв. № 5.141.*

## **Исследование влияния содержания железа и молибдена на коррозионное поведение сплавов циркония систем Zr–Fe–W и Zr–Fe–Cr–Mo в потоке перегретого пара в интервале температур 400–500 °С**

*Исполнители: инженеры В.А. Гашенко, Г.С. Полякова (НПО «Энергия»), канд. техн. наук А.Г. Агеев, инженер Н.М. Александрова (ЭНИИ), канд. техн. наук А.В. Никулина, инженер И.В. Удалова (предприятие п/я Р-6575)*

Представлены результаты исследования коррозионного поведения циркониевых сплавов систем Zr–Fe–W и Zr–Fe–Cr–Mo в потоке перегретого пара при температурах 400, 450, и 500 °С в зависимости от содержания в них железа (от 0,2 до 1,5 % вес) и молибдена (от 0,2 до 0,4 % вес).

Показано, что увеличение содержания железа в сплавах указанных систем улучшает их коррозионные свойства, причём оптимальным является

содержание железа в количестве 1 % вес. Напротив, с увеличением содержания молибдена в указанных пределах коррозионное поведение сплавов ухудшается.

*Исследование влияния содержания железа и молибдена на коррозионное поведение сплавов циркония систем  $Zr-Fe-W$  и  $Zr-Fe-Cr-Mo$  в потоке перегретого пара в интервале температур 400-500 °С: отчёт о НИР / ЭНИС НПО «Энергия», ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я Р-6575; исполн.: В.А. Гашенко, Г.С. Полякова, А.Г. Агеев и др. — М., 1976. — 54 с. — Инв. № 44.*

### **Исследования погружённого дырчатого щита барабана-сепаратора реактора РБМК-1500 на стенде ЭНИС в 1976 году**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, В.И. Белов (ЭНИС), канд. техн. наук В.Б. Карасёв, В.К. Сафонов (предприятие п/я А-7291)*

Представлены результаты проведённых в соответствии с «Программой отработки внутрикорпусных устройств барабан-сепаратора реактора РБМК-1500 на пароводяном стенде ЭНИС НПО «Энергия» исследований пяти конструкций погруженных дырчатых листов.

Цель экспериментов заключалась в выборе сепарационного устройства, обеспечивающего максимальную паровую нагрузку.

Параметры исследования:

Давление  $P = 70$  кгс/см<sup>2</sup>

Приведённая скорость пара  $w_0 = 0,25-0,75$  м/с

Весовой уровень  $H_v = -50+350$  мм

Отмечается, что наибольшие паровые нагрузки достигнуты на дырчатом щите с патрубками выше и ниже щита, с боковой раздачей пара над щитом и увеличенным живым сечением. Для этой конструкции при влажности отсепарированного пара 0,1 %, номинальном положении весового уровня 100 мм и равномерной нагрузке щита приведённая скорость пара на зеркале составляет 0,59 м/с (коэффициент запаса по нагрузке 2,24).

*Исследования погружённого дырчатого щита барабана-сепаратора реактора РБМК-1500 на стенде ЭНИС в 1976 году: протокол ЭНИС НПО «Энергия» / исполн.: В.Д. Байнякшин, В.И. Белов, В.Б. Карасёв, В.К. Сафонов. — Электрогорск, 1976. — 21 с. — Инв. № 6/76.*

### **Определение вибрационных и пульсационных характеристик и ресурсные испытания кассеты РБМК-1500**

*Исполнители: инженеры В.Н. Филиппов, В.Н. Ершов, В.Н. Гаврилов, В.Д. Сизарев, Г.И. Коротченко, Г.И. Рослов, А.Н. Пономарев, механик Е.Е. Лебедев (предприятие п/я А-7291), канд. техн. наук А.А. Любимов (ЭНИИ), инженеры В.Д. Байнякшин, Т.В. Бабахина, техник Т.М. Малафеева*

Представлены результаты длительных (1000 ч) испытаний двух полномасштабных технологических каналов с кассетами аппарата РБМК-1500 при штатных параметрах теплоносителя.

В первом технологическом канале, выполненном из нержавеющей стали, испытана кассета с интенсификаторами теплообмена, оснащенная тремя макетами твэл, оборудованными тензометрическими датчиками. Измерены амплитуды колебания твэл и максимальные напряжения, возникающие в них, при расходах теплоносителя до 30 т/ч и весовых паросодержаниях до 40 % для различных форм статических изгибов кассеты.

Во втором технологическом канале, выполненном из циркония, испытана штатная кассета РБМК-1500 с интенсификаторами теплообмена в стационарном режиме.

*Определение вибрационных и пульсационных характеристик и ресурсные испытания кассеты РБМК-1500: отчет НИР / предприятие п/я А-7291, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, НПО «Энергия»; исполн.: В.Н. Филиппов, В.Н. Ершов, В.Н. Гаврилов и др. — М., 1977. — Инв. № 5.165.*

### **Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик модели перегревательной ТВС**

*Отв. исполнители: инженеры Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, Г.А. Регентова (ЭИЛ), канд. техн. наук В.П. Смирнов, инженер Е.Д. Огин (предприятие п/я А-7291)*

Представлены результаты экспериментального исследования на обогреваемой модели пучка стрежней тепловыделяющей сборки реактора типа РБМ-КП при давлении 80 кг/см<sup>2</sup>, температурах пара на входе 350–450 °С, при подогревах пара на 60 °С, удельных плотностях теплового потока до 5×10<sup>5</sup> ккал/м<sup>2</sup>·ч, расходах пара 2–11 т/ч и максимальной температуре поверхности твэлов 640 °С. Обнаружена неравномерность температур поверхностей твэлов в поперечном сечении и по периметру твэлов.

Отмечается, что найдена длина участка стабилизации коэффициента теплоотдачи между соседними дистанционными решетками.

Показана неправомерность одномерного подхода к расчетам процесса теплообмена в стержневых сборках с большой теплогидравлической неравноценностью ячеек.

*Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик модели перегревательной ТВС: отчет о НИР / ЭНИС, НПО «Энергия», предприятие п/я А-7291; исполн.: Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, Г.А. Регентова и др. — Электргорск, 1977. — 98 с. — Инв. № 162.*

### **Экспериментальные исследования стационарных характеристик моделей аварийных ограничителей расхода для реактора РБМК-1500**

*Исполнители: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко, инженер С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин (НПО «Энергия»); канд. техн. наук Э.К. Карасев, инженер Б.А. Габараев (предприятие п/я А-7291)*

Экспериментально исследовались расходные характеристики моделей вставок-ограничителей аварийного расхода при разрыве раздаточного группового коллектора реактора РБМК-1500. Модели представляли собой осе-

симметричные сопла, составленные из трех элементов: входного участка со скруглением четверти окружности, цилиндрического участка (диаметр от 10 до 30 мм, длина от 0 до 160 мм) и расширяющегося конического диффузора. Исследование выполнено на 9 соплах с различной геометрией проточной части в диапазоне начальных давлений 10–19 кгс/см<sup>2</sup> при недогревах на входе от 0 до 100 °С. Предметом исследования являлись гидравлические сопротивления, продольные профили статического давления и расходные характеристики.

*Экспериментальные исследования стационарных характеристик моделей аварийных ограничителей расхода для реактора РБМК-1500: отчет о НИР / НПО «Энергия», предприятие п/я А-7291; исполн.: Л.К. Тихоненко, С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин и др. — Электрогорск, 1977. — 107 с. — Инв. № 1.159.*

### **Экспериментальная отработка способов повышения мощности испарительных каналов реактора РБМ-К**

*Исполнители: инженеры А.Ф. Чалых, Е.В. Столяров (ЭНИС), А.И. Емельянов (предприятие п/я А-7291 инженер), Т. Югай (ЭНИН)*

Представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных предприятием п/я А-7291, ЭНИС НПО «Энергия» и ЭНИНом на электрообогреваемом стенде № 108-2 ЭНИС НПО «Энергия» с целью дальнейшей отработки эффективных интенсификаторов теплообмена применительно к испарительному каналу реактора РБМ-К-1500.

Отмечается, что исследования проводились в следующем диапазоне режимных параметров: давление — 75 бар, массовая скорость 1000–2000 кг/м<sup>2</sup>·с, массовое паросодержание 0,3–0,8, плотность теплового потока до 1,1 МВт/м<sup>2</sup>. Опытные данные получены по кризису теплоотдачи, температурным режимам в закризисной области, а также по гидравлическому сопротивлению в диапазоне режимных чисел Рейнольдса от  $3,6 \cdot 10^3$  до  $1,7 \cdot 10^5$ .

*Экспериментальная отработка способов повышения мощности испарительных каналов реактора РБМ-К: отчет о НИР / ЭНИС НПО «Энергия»; исполн.: А.Ф. Чалых, Е.В. Столяров, А.И. Емельянов, Т. Югай. — М.—Электрогорск. — 125 с. — 1978, Инв. № 2.185.*

### **Экспериментальное исследование стационарных характеристик аварийных ограничителей расхода для реакторов типа РБМ-КП**

*Исполнители: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко, инженер С.З. Лутовинов, инженер Е.И. Трубкин (ЭНИС НПО «Энергия»), канд. техн. наук Э.К. Карасев, инженер Б.А. Габараев (предприятие п/я А-7291)*

В отчете содержатся результаты экспериментального изучения процесса истечения насыщенной и недогретой воды через сужающиеся осесимметричные сопла  $d=4$  мм и  $L=3,5–30$  мм, а также через сопла Лавалья без протяженного цилиндрического участка и углами выходного диффузора

3 и 12° применительно к РБМК. Исследование проведено в диапазоне начальных давлений 10–90 кгс/м<sup>2</sup> и входных температур потока от 104 °С и  $t_s$ . Полученные результаты качественно согласуются с результатами, изложенными ранее.

Установлено, что при истечении из коротких сужающих сопел изменение длины от 6 до 30 мм влияет на предельный (или критический) расход слабо, а уменьшение длины от 6 до 0 ведет к быстрому снижению расхода до значений, соответствующих истечению через диафрагму. Аналогично ведет себя величина гидравлического коэффициента расхода сопла.

При истечении из сопел Лаваля без цилиндрического участка изменение угла раскрытия выходного диффузора в пределах 3–12° приводит к изменению критического расхода. Переход от угла 12° к внезапному расширению ведет к возрастанию критического расхода на 6–15 % в зависимости от входных параметров потока.

*Экспериментальное исследование стационарных характеристик аварийных ограничителей расхода для реакторов типа РБМ-КП: отчет о НИР/НПО «Энергия», предприятие п/я А-7291; исполн.: Л.К. Тихоненко, С.З. Лутовинов, Э.К. Карасев и др. — Электрогорск, 1978. — 42 с. — Инв. № 1.174.*

### **Испытания датчика непрерывного измерения влажности отсепарированного пара**

*Отв. исполнители: инженер Е.А. Лобачёва (ЭНИС), инженер В.Н. Сафонов (предприятие п/я А-7291), канд. техн. наук Б.А. Кольчугин (ЭНИН); исполнители: инженер В.Д. Байнякшин (ЭНИС); канд. техн. наук В.Б. Карасёв, инженеры Е.В. Сакович, И.Т. Серов (предприятие п/я А-7291), канд. техн. наук А.Г. Агеев (ЭНИН)*

Проведено экспериментальное исследование двух типов датчиков (сопло и напорный датчик) для определения возможности их использования в качестве датчиков внезапного увеличения влажности в паропроводе при давлениях 30÷70 кгс/см<sup>2</sup>, расходах пара 3÷7,7 т/ч и влажности 0÷80 %.

Исследованиями установлено, что зависимость относительных перепадов (перепад статического давления на датчике при движении влажного пара к перепаду, имеющему место при движении только паровой фазы) от влажности обоих датчиков близки и могут быть описаны одним приближённым уравнением. Установлено, что в качестве датчика влажности при постоянной паровой нагрузке можно использовать расходомерное сопло.

*Испытания датчика непрерывного измерения влажности отсепарированного пара: отчёт о НИР/ЭНИС НПО «Энергия»; исполн.: Е.А. Лобачёва, В.Н. Сафонов, Б.А. Кольчугин и др. — Электрогорск, 1978. — 59 с. — Инв. № 5.181.*

### **Экспериментальное определение увеличения паровых нагрузок и запасов воды в барабан-сепараторе реактора типа РБМК при установке на погруженном щите безбарботажных насадков**

*Исполнители: В.И. Белов (ЭНИС), В.К. Сафонов (предприятие н/я А-7291), инженер В.Д. Байнякшин (ЭНИС), канд. техн. наук В.Б. Карасев (предприятие н/я А-7291), канд. техн. наук. А.Г. Агеев (ЭНИИ)*

Приведены результаты экспериментальной отработки конструкций элементов погружённого щита с безбарботажными насадками с целью выявления сепарационных характеристик и возможности упрощения их конструкций. Испытания проводились в цилиндрическом ( $\varnothing$  300, высота 950 мм) и профилированном применительно к РБМК-1000 паровом объёме (диаметр основания 300 мм, высота 740 мм при давлении 7,0 МПа, приведённых скоростях пара  $0,2 \div 0,97$  м/с и весовых уровнях  $20 \div 640$  мм).

Показано, что применение погруженных щитов с высотой закраин 200 мм и безбарботажными насадками всех исследованных конструкций позволяет реализовать паровую нагрузку в 1,6–3 раза большую, по сравнению с обычными погруженными дырчатыми щитами при среднем весовом уровне 350 мм.

Отмечается, что в условиях работы барабана-сепаратора РБМК-1000 установка насадков может позволить увеличить паровую нагрузку в 1,8 раза при одновременном увеличении весового уровня до 300 мм.

*Экспериментальное определение увеличения паровых нагрузок и запасов воды в барабан-сепараторе реактора типа РБМК при установке на погруженном щите безбарботажных насадков: отчет о НИР / ЭНИС НПО «Энергия»; исполн.: В.И. Белов, В.К. Сафонов, В.Д. Байнякшин и др. — Электрогорск, 1978. — 49 с. — Инв. № 5.170.*

### **Испытания макета пароперегревательного канала и его элементов**

*Отв. исполнитель инженер В.Д. Байнякшин; исполнители:*

*инженер А.А. Хохонова, техник Т.В. Корючева (ЭНИС),*

*инженеры И.И. Акимов, В.Н. Гаврилов, Г.И. Коротченко, А.В. Лавров, Т.С.*

*Максимова, Э.В. Можарова, А.Н. Пономарев, Е.В. Чермашенцев,*

*И.Г. Шутько, О.А. Ярмоленко (предприятие н/я А-7291)*

Проведено испытание (4500 часов) полномасштабных макетов пароперегревательного канала и необогреваемой кассеты при параметрах  $G_{п} = 14$  т/ч,  $P = 80$  кгс/см<sup>2</sup>,  $T$  до 350 °С с подводом в защитный кожух канала азота с влажностью  $\sim 5$  г/м<sup>3</sup> при температуре 20 °С для имитации защитной среды в кладке активной зоны. Представлены полученные данные по скорости радиальной ползучести канальной циркониевой трубы, коррозионные показатели и др.

*Испытания макета пароперегревательного канала и его элементов: отчет о НИР / ЭНИС, НПО «Энергия», предприятие н/я А-7291; исполн.: В.Д. Байнякшин, А.А. Хохонова, Т.В. Корючева и др. — Электрогорск, 1978. — 67 с. — Инв. № 5.166.*

### **Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик модели перегревательной ТВС реактора типа РБМ-КП**

*Отв. исполнители: инженеры Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, Г.А. Регентова (ЭНИС), канд. техн. наук В.П. Смирнов, инженер Е.Д. Огин (предприятие п/я А-7291)*

Проведено экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик обогреваемой модели тепловыделяющей сборки кассеты реактора типа РБМ-КП с нанесенной на поверхность твэлов методом электрохимической обработки искусственной шероховатостью. Исследование проведено при  $P = 80$  кгс/см<sup>2</sup>,  $T$  пара на входе 350–450 °С, при подогревах пара на 130 °С,  $q$  до  $6,2 \cdot 10^5$  ккал/м<sup>2</sup>·ч;  $G$  пара 2–10,5 т/ч; максимальная температура поверхности твэлов 600 °С. В диапазоне изменения числа Рейнольдса  $(3-6)10^5$  определен коэффициент трения пучка с исследованной шероховатостью.

*Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик модели перегревательной ТВС реактора типа РБМ-КП: отчет о НИР / ЭНИС, НПО «Энергия», предприятие п/я А-7291; исполн.: Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, Г.А. Регентова и др. — Электрогорск, 1978. — 103 с. — Инв. № 2.177.*

### **Экспериментальное изучение коррозионной стойкости сплавов циркония в пароводяной смеси с повышенным паросодержанием**

*Руководитель темы канд. техн. наук А.В. Никулина (предприятие п/я Р-6575); отв. исполнители: инженеры И.Н. Горячкин (ЭНИС), М.Б. Фивейский, А.Р. Завьялов (предприятие п/я Р-6575); исполнители: инженер В.А. Гашенко (ЭНИС); техник Л.В. Графова (предприятие п/я Р-6575)*

На экспериментальном стенде в условиях, имитирующих условия их работы в теплоносителе реактора РБМК-1500, проведены коррозионные испытания изготовленных из различных сплавов циркония образцов имитаторов ТВЭЛ и плоских образцов, вырезанных из канальных труб, длительностью 2470 часов.

На основании полученных в процессе проведения испытаний экспериментальных данных построены кривые кинетики окисления сплавов, установлен оптимальный режим термообработки имитаторов ТВЭЛ.

С помощью металлографического анализа определены толщины сформировавшихся на сплавах в процессе испытаний окисных плёнок и степень их наводороживания.

*Экспериментальное изучение коррозионной стойкости сплавов циркония в пароводяной смеси с повышенным паросодержанием: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я Р-6575; рук. А.В. Никулина; исполн.: И.Н. Горячкин, М.Б. Фивейский, А.Р. Завьялов и др. — Электрогорск, 1979. — 42 с. — Инв. № 6.197.*

### **Экспериментальное исследование истечения недогретой и насыщенной воды через каналы сложной геометрии (ЗРК и сопло с поперечным вдувом)**

*Исполнители: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко, инженеры С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин (ЭНИС), канд. техн. наук Э.К. Карасёв, В.П. Василевский, инженеры Б.А. Габараев, Е.Ф. Брилёв (предприятие п/я А-7291)*

Приведены результаты экспериментального исследования расходных характеристик двух каналов сложной геометрии: запорно-регулирующего клапана (ЗРК) для реакторов типа РБМ-К и сопла с поперечным вдувом, являющегося альтернативной моделью аварийного ограничителя расхода теплоносителя при разрыве трубопроводов циркуляционного контура.

Исследование ЗРК проведено в диапазоне начальных давлений  $10 \div 85$  кгс/см<sup>2</sup> на воде при входных недогревах  $0 \div 50$  °С и на пароводяной смеси с массовым паросодержанием  $x=0-1$ , а сопла на воде при начальных давлениях  $10 \div 40$  кгс/см<sup>2</sup> и входных недогревах  $0 \div 30$  °С.

*Экспериментальное исследование истечения недогретой и насыщенной воды через каналы сложной геометрии (ЗРК и сопло с поперечным вдувом): отчёт о НИР / ЭНИС НПО «Энергия», предприятие п/я А-7291; исполн.: Л.К. Тихоненко, С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин и др. — Электрогорск, 1979. — 43 с. — Инв. № 1.189.*

### **Экспериментальное изучение коррозионной стойкости сталей 20 и 1Х18Н10Т применительно к условиям водного режима конденсатно-питательного тракта АЭС с реакторами РБМК**

*Отв. исполнители: инженер О.Н. Абакумова (ЭНИС), канд. техн. наук Е.Б. Мацкевич (ЭНИН); исполнители: инженер В.А. Гашенко (ЭНИС), канд. техн. наук И.С. Дубровский (ЭНИН)*

Представлены результаты коррозионных испытаний конструкционных сталей марок 1Х18Н10Т и стали 20 в потоках деаэрированной и кислородсодержащей воды в условиях, близких к условиям эксплуатации конденсатно-питательного тракта АЭС с РБМК ( $P \approx 9,8$  МПа,  $t=60, 150, 200$  °С;  $Wп \approx 0; 0, 4; 1; 4$  м/с; электропроводимость  $\sim 0,6$  мкСм/см), а также изученное на образцах стали 20 влияние различных условий простоя на защитные свойства окисных плёнок, полученных в потоках деаэрированной и кислородсодержащей воды.

Выявлены стояночные режимы, не снижающие защитных свойств формирующихся на сталях окисных плёнок.

Изучено влияние предварительной обработки поверхности стали 20 ингибированной соляной кислотой на коррозионное поведение её в указанных условиях.

Приведены данные фазового анализа окисных плёнок, полученных на стали 20, в потоках кислородсодержащей и деаэрированной воды.

Дано заключение о возможности применения стали 20 в условиях КПП АЭС с РБМК.

*Экспериментальное изучение коррозионной стойкости сталей 20 и 1X18H10T применительно к условиям водного режима конденсатно-питательного тракта АЭС с реакторами РБМК: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: О.Н. Абакумова, Е.Б. Мацкевич, В.А. Гашенко и др. — Электрогорск, 1979. — 91 с. — Инв. № 6.191.*

### **Экспериментальная отработка способов повышения мощности испарительных каналов реактора РБМК**

*Отв. исполнители: инженеры А.Ф. Чалых, Е.В. Столяров (ЭНИС), А.И. Емельянов (предприятие п/я А-7291), Т. Югай (ЭНИН)*

В отчете изложены результаты экспериментального исследования кризиса теплоотдачи на 19-стержневых сборках, представляющих собой модель верхней части испарительной кассеты реактора РБМК, натурального поперечного сечения обогреваемой длиной 1,1 м с различными типами интенсификаторов теплообмена. Исследование проведено при давлении 7,5 МПа, массовых скоростях 1000–2000 кг/(м<sup>2</sup>·с), массовых паросодержаниях на выходе 0,3–0,8 и плотностях теплового потока до 1,1 МВт/м<sup>2</sup>. В опытах осуществлялась фиксация кризиса теплоотдачи по показаниям термопар, ориентированных в наиболее тепло напряженные зоны сборки, что позволило определить влияние отдельных элементов интенсификаторов теплообмена на возникновение кризиса теплоотдачи.

Представлены также результаты опытов по гидравлическому сопротивлению сборок при адиабатном течении воды в диапазоне чисел Рейнольдса от  $3,8 \cdot 10^3$  до  $1,7 \cdot 10^5$ .

*Экспериментальная отработка способов повышения мощности испарительных каналов реактора РБМК: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я А-7291, исполн.: А.Ф. Чалых, Е.В. Столяров, А.И. Емельянов, Т. Югай. — Электрогорск, 1980. — 135 с. — Инв. № 22,208.*

### **Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик модели перегревательной ТВС реактора типа РБМ-КП**

*Отв. исполнители: инженеры Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, Г.И. Манойленко (ЭНИС), канд. техн. наук В.П. Смирнов, инженер Е.Д. Олин (предприятие п/я А-7291)*

Проведено экспериментальное исследование на обогреваемой модели пучка стержней тепловыделяющей сборки реактора типа РБМ-КП при давлении пара на входе 78,5 бар, температуре пара на входе 350 °С при подогревах пара на 60 °С, удельных плотностях теплового потока до 0,64 МВт/м<sup>2</sup>, расходах пара 5–10,5 т/ч и максимальной температуре поверхности трубок 610 °С. Обнаружена неравномерность температуры поверхности трубок в поперечном сечении пучка и по периметру трубок.

Сделано сопоставление расчётных и опытных значений температуры пара и стенки трубок в поперечном сечении сборки.

*Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик модели перегревательной ТВС реактора типа РБМК-КП: отчёт о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, Г.И. Маноиленко и др. — Электрогорск, 1980. — 77 с. — Инв. № 22.207.*

### **Ресурсные испытания макетов кассеты и канала РБМК-1500**

*Руководитель темы инженер В.Д. Байнякин; отв. исполнитель инженер Н.П. Цыпулева; исполнители: инженеры В.Д. Байнякин, техник Т.М. Малафеева; отв. исполнитель инженер Н.В. Глаголева, исполнители: инженеры В.Я. Абрамов, В.Н. Гаврилов, М.А. Дианов, В.Н. Филиппов, Е.В. Чермашенцев, О.А. Ярмоленко, канд. техн. наук В.Н. Ершов, Ю.С. Кузьмичев, Б.С. Родченков, В.Д. Сизарев, И.Г. Шутько (предприятие п/я А-7291); исполнитель канд. техн. наук А.А. Любимов (ЭНИН)*

Работа включала длительные (10 тыс. часов) испытания макета кассеты РБМК-1500 при параметрах теплоносителя  $R_{\text{вых}} = 70 \text{ кгс/см}^2$ ,  $T = 280 \text{ }^\circ\text{C}$ . Получены результаты поэлементного осмотра и металлографических исследований, проведенных после испытаний. Кроме того, проведен анализ результатов измерения глубины износа имитаторов твэлов в верхней и нижней ТВС.

*Ресурсные испытания макетов кассеты и канала РБМК-1500: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291, ЭНИН им. Г.М.Кржижановского; рук. В.Д. Байнякин; исполн.: Н.П. Цыпулева, В.Д. Байнякин, Т.М. Малафеева и др. — Электрогорск, 1980. — 112 с. — Инв. № 5.200.*

### **Испытания макетов перегревательного канала**

*Руководитель темы инженер В.Д. Байнякин; отв. исполнитель инженер А.А. Хохонова, техник Т.В. Корючева (ЭНИС ВНИИАЭС); исполнители: инженеры Т.С. Максимова, Л.Т. Руденская, Э.В. Можарова, инженеры И.И. Акимов, В.И. Монаков, П.П. Поминов, М.П. Сигачева, З.А. Толстых, Р.С. Храпова, С.С. Шилло, И.Г. Шутько, лаборант Н.В. Евсеева (предприятие п/я А-7291)*

Представлены результаты проведенных в течение 3008 часов испытаний четырехзвенного канала, изготовленного из четырех макетов циркониевой трубы перегревательного канала реактора РБМК-КП -2400. Канал продувался перегретым паром с параметрами:  $G_{\text{пп}} 20 \text{ т/ч}$ ,  $P=80 \text{ кгс/см}^2$ , температурой  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ; снаружи каналов продувалась парозотная смесь. Получены данные по коррозионной стойкости и величине установившейся радиальной ползучести для элементов испытанных макетов перегревательного канала.

*Испытания макетов перегревательного канала: отчет о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; рук. В.Д. Байнякин; исполн.: А.А. Хохонова, Т.В. Корючева, Т.С. Максимова и др. — Электрогорск, 1980. — 92 с. — Инв. № 51.*

## Работы применительно к кипящим реакторам корпусного типа

### Экспериментальная отработка струйного термонасоса для создания принудительной циркуляции в кипящем реакторе

*Руководитель темы канд. техн. наук Э.К. Карасев (предприятие н/я А-7291); отв. исполнители: инженеры М.С. Куракина, Е.И. Трубкин (ЭИЛ), инженер В.В. Вазингер (предприятие н/я А-7291)*

Представлены результаты промежуточного этапа исследований по созданию струйного термонасоса, как источника циркуляции в кипящем реакторе. Модель термонасоса, описанная в данной работе, принята за базовую. Получена граница устойчивости термонасоса в зависимости от расхода холодной воды. Исследовано влияние некоторых геометрических факторов на работу термонасоса. Выполнены исследования влияния температуры питательной воды на работу термонасоса.

*Экспериментальная отработка струйного термонасоса для создания принудительной циркуляции в кипящем реакторе: отчет о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, предприятие н/я А-7291; рук. Э.К. Карасев; исполн.: Н.С. Куракина, Е.И. Трубкин, В.В. Вазингер. — Электрогорск, 1971. — 28 с. — Инв. № 678.*

### Исследование работы циркуляционного контура реакторов типа ЭВП

*Отв. исполнители: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко (ЭИЛ), инженер Н.А. Ахапкин (предприятие н/я П-7291)*

Экспериментально исследованы характеристики циркуляционного контура кипящего реактора корпусного типа на воздуховодяной модели. Исследование проводилось с целью подбора оптимальной конструкции тягового участка и опускного канала без установки в последнем случае специальных противозахватных устройств. Получены опытные данные по локальным и средним истинным воздухосодержаниям и величинам захвата воздуха в опускной канал. Предложены меры по снижению захвата и повышению эффективности работы циркуляционного контура.

*Исследование работы циркуляционного контура реакторов типа ЭВП: отчет о НИР / ЭИЛ, предприятие н/я А-7291, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Л.К. Тихоненко, Н.А. Ахапкин. — Электрогорск, 1972. — 78 с. — Инв. № 93.*

### Экспериментальная отработка струйного термонасоса для создания принудительной циркуляции в кипящем реакторе

*Руководитель темы канд. техн. наук Э.К. Карасёв (предприятие н/я А-7291); отв. исполнители: инженеры Е.И. Трубкин, Н.С. Куракина (ЭИЛ), инженер В.В. Вазингер (предприятие н/я А-7291)*

Проведены исследования по созданию струйного термонасоса как источника циркуляции в кипящем реакторе. Получена граница устойчивости для базовой модели термонасоса в зависимости от расхода холодной воды. Исследовано влияние некоторых геометрических факторов на работу

термонасоса. Исследован спектр звуковых частот шума, возникающего при работе термонасоса в контуре экспериментального стенда.

*Экспериментальная отработка струйного термонасоса для создания принудительной циркуляции в кипящем реакторе: отчёт о НИР / ЭИЛ, предприятие п/я А-7291; рук. Э.К. Карасёв; исполн.: Е.И. Трубкин, Н.С. Куракина, В.В. Вазингер. — Электрогорск, 1972. — 29 с. — Инв. № 0678.*

### **Экспериментальное исследование турбосепараторов**

#### **для сепарационных систем кипящих реакторов**

*Отв. исполнители: инженеры Е.А. Лобачёва (ЭИЛ), В.Б. Проклов (ИАЭ), канд. техн. наук В.Б. Карасёв (предприятие п/я А-7291), канд. техн. наук А.Г. Агеев, И.С. Дубровский (ЭНИН)*

Приведены результаты исследования турбосепараторов диаметром 80, 88 и 154 мм, предназначенных для сепарационных систем кипящих реакторов. Опыты проведены на пароводяной смеси при давлении 70 ата (частично при 30 и 50 ата) и начальном паросодержании от 10 до 30%.

*Экспериментальное исследование турбосепараторов для сепарационных систем кипящих реакторов: отчёт о НИР / ЭИЛ, ИАЭ им. И.В. Курчатова, предприятие п/я А-7291, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Е.А. Лобачёва, В.Б. Проклов, В.Б. Карасёв и др. — М., 1972. — 126 с. — Инв. № 15.*

### **Вариантная проработка корпусного кипящего водоводяного реактора Ne=500 МВт**

*Отв. исполнители: канд. техн. наук И.С. Дубровский, А.Г. Агеев, Югай Тезей (ЭНИН), Н.П. Ларионов (ЭИЛ)*

Выполнена вариантная проработка кипящего водоводяного реактора Ne=500 МВт с железобетонным корпусом с принудительной циркуляцией теплоносителя и инерционной сепарацией пара. Дано описание основных элементов циркуляционного контура реактора и анализируются тепловые, гидродинамические и сепарационные процессы. Отмечается, что высокие технико-экономические показатели вариантного реактора получены, главным образом, в результате применения эффективных отечественных сепараторов пароводяной смеси и струйных насосов, встроенных в корпус реактора.

*Вариантная проработка корпусного кипящего водоводяного реактора Ne=500 МВт: отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: И.С. Дубровский, А.Г. Агеев, Югай Тезей, Н.П. Ларионов. — Электрогорск, 1973. — 44 с. — Инв. № 22.*

### **Ресурсные испытания рабочих сопел СЦН**

*Исполнители: инженеры Н.П. Ларионов, Е.И. Трубкин*

Приведены результаты ресурсных испытаний на эрозионную стойкость моделей рабочих сопел струйных циркуляционных насосов, изготовленных из различных конструкционных материалов (нержавеющие стали 1Х18Н10Т, ЭП-337 и титановый сплав ВТ-5). Сопла испытывались при скоростях

истечения рабочей жидкости (питательная вода котла высокого давления) 105–110 м/с, при температуре 104 и 170 °С в течение 5200 часов.

*Ресурсные испытания рабочих сопел СЦН: отчёт о НИР / ЭИЛ; исполн.: Н.П. Ларионов, Е.И. Трубкин. — Электрогорск, 1974. — 42 с. — Инв. № 25.*

### **Экспериментальная отработка струйного термонасоса для создания принудительной циркуляции в кипящем реакторе**

*Руководитель темы канд. техн. наук Э.К. Карасев (предприятие п/я А-7291), отв. исполнители: инженер Е.И. Трубкин (ЭИЛ), инженер В.В. Вазингер (предприятие п/я А-7291)*

Представлены результаты по оптимизации геометрии проточной части термонасоса, способного работать при подаче в камеру смешения питательной воды с температурой до 165 °С. Исследованы пусковые устройства термонасоса — пусковая игла и подвижной диффузор.

*Экспериментальная отработка струйного термонасоса для создания принудительной циркуляции в кипящем реакторе: отчет о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, предприятие п/я А-7291; рук. Э.К. Карасев; исполн.: Е.И. Трубкин, В.В. Вазингер. — Электрогорск, 1974. — 43 с. — Инв. № 682.*

### **Технический проект струйного циркуляционного насоса (СЦН) для реактора ВК-50. Исследование модели СЦН**

*Исполнители: инженеры Н.П. Ларионов, Н.С. Куракина, С.З. Лутовинов*

В работе даются экспериментальные обоснования методики расчёта и конструирования струйных циркуляционных насосов (СЦН) в плане выполнения технического проекта СЦП для реактора ВК-50.

Приведены результаты стендовых испытаний модели СЦП при параметрах реактора ВК-50. В качестве базовой модели выбрана модель головного образца СЦП для реактора ЭГП-6, так как её основные характеристики соответствуют заданным для реактора ВК-50.

Делается заключение, что испытания свидетельствуют об отклонении характеристик исследуемой модели СЦП от ожидаемых расчётных из-за повышенных гидравлических потерь во входном сопле в камере смешения. Указано, что при моделировании СЦП, кроме идентичности основного параметра  $m$  следует моделировать условия входа и обеспечивать соответствующий класс чистоты при изготовлении проточной части СЦП с тем, чтобы обеспечить равенство коэффициентов сопротивления модели и прототипа.

*Технический проект струйного циркуляционного насоса (СЦН) для реактора ВК-50. Исследование модели СЦН: отчёт о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго; исполн.: Н.П. Ларионов, Н.С. Куракина, С.З. Лутовинов. — Электрогорск, 1974. — 45 с. — инв. № 26.*

### **Экспериментальная отработка способов повышения мощности технологических каналов реакторов. Кольцевой канал**

*Отв. исполнители: инженеры Н.А. Коняхина, Е.В. Столяров, Г.А. Регентова (ЭИЛ), инженеры В.В. Перемыщев, А.Н. Рябов (предприятие п/я А-7291)*

В отчете представлены результаты экспериментального исследования кризиса теплоотдачи на модели наружной гладкой кольцевой щели технологического канала реактора типа ВМ-2АГ. Эксперименты проведены массовой скорости  $\rho_w = 2000 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$  и температуре вода на входе от  $100^\circ\text{C}$  до  $(t_s - 10)^\circ\text{C}$ .

*Экспериментальная отработка способов повышения мощности технологических каналов реакторов. Кольцевой канал: отчет о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, предприятие п/я А-7291; исполн.: Н.А. Коняхина, Е.В. Столяров, Г.А. Регентова и др. — М.—Электрогорск, 1974. — 35 с. — Инв. № 798.*

### **Экспериментальная отработка способов повышения мощности технологических каналов реакторов. Кольцевой канал**

*Исполнители: инженеры Н.А. Коняхина (Бондаренко), Г.А. Регентова (ЭНИС НПО «Энергия»), инженер А.В. Рябов (предприятие п/я А-7291)*

Экспериментально исследована и отработана возможность повышения мощности технологических каналов реактора с помощью интенсификаторов на теплоотдающей поверхности применительно к кольцевому каналу. Проведены исследования на кольцевом канале с интенсификаторами в виде поперечных кольцевых гофр. Эксперименты проведены для  $P = 98\text{--}196 \text{ бар}$ ,  $\rho_w = 1000\text{--}2000 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ . Температура воды на входе изменялась в пределах от  $87$  до  $350^\circ\text{C}$ .

*Экспериментальная отработка способов повышения мощности технологических каналов реакторов. Кольцевой канал: отчет о НИР / НПО «Энергия», предприятие п/я 7291; исполн.: Н.А. Коняхина, Г.А. Регентова, А.В. Рябов. — Электрогорск, 1975. — 34 с. — Инв. № 800*

*Экспериментальная отработка способов повышения мощности технологических каналов реакторов. Кольцевой канал: отчет о НИР / НПО «Энергия», предприятие п/я 7291; исполн.: Н.А. Бондаренко, Г.А. Регентова, А.В. Рябов. — Электрогорск, 1976. — 46 с. — Инв. № 802.*

### **Экспериментальная отработка двухступенчатого струйного циркуляционного насоса**

*Отв. исполнитель инженер Н.П. Ларионов;  
исполнитель инженер Е.И. Трубкин*

В работе отмечается, что с целью повышения устойчивости и надёжности работы ранее предложенной схемы организации многократной принудительной циркуляции (МПЦ) в кипящих реакторах, предусматривающей использование всей подаваемой в реактор питательной воды в качестве рабочей жидкости струйных циркуляционных насосов (схема ПН-СЦН), предлагается использование в качестве СЦН двухступенчатого струйного насоса.

Приведена методика инженерного расчёта двухступенчатого СЦН; приведены результаты экспериментальных исследований модели двухступенчатого струйного насоса в рабочих режимах в сравнении с одноступенчатой моделью.

Проведёнными исследованиями подтверждена эффективность предложенного способа повышения кавитационной устойчивости струйного насоса путём разделения процесса смешения на две ступени, заложенного в основу конструкции двухступенчатого насоса.

Отмечается также, что результаты ресурсных испытаний модели двухступенчатого струйного насоса длительностью 1000 часов, выявили необходимость конструктивной отработки способов предотвращения кавитационного разрушения входного участка камеры смешения.

*Экспериментальная отработка двухступенчатого струйного циркуляционного насоса: отчёт о НИР / ЭНИС НПО «Энергия»; исполн.: Н.П. Ларионов, Е.И. Трубкин. — Электрогорск, 1976. — 45 с. — Инв. № 43.*

### **Экспериментальное исследование гидродинамики и кризиса теплоотдачи в стержневом канале применительно к условиям работы активной зоны аппарата ВК-500**

*Исполнители: инженеры Г.Г. Басова, М.П. Гашенко (ЭНИС НПО «Энергия»), канд. техн. наук И.Х. Колодцев, инженер С.Д. Крушенок (НПО «Энергия»), инженеры Б.М. Корольков, Т. Югай (ЭНИН)*

Проведено комплексное экспериментальное исследование гидродинамики двухфазного потока и кризиса теплоотдачи на семистержневой сборке с равноценными в теплогидравлическом отношении ячейками, моделирующими кассету активной зоны реактора ВК-500 с применением быстродействующих систем контроля измеряемых величин. Исследование проведено в следующем диапазоне изменения режимных параметров:  $P=98$  бар,  $\rho_w=500-2000$  кг/м<sup>2</sup>·с,  $q$  от 0,4 МВт/м<sup>2</sup> до  $q_{кр.}$ .

*Экспериментальное исследование гидродинамики и кризиса теплоотдачи в стержневом канале применительно к условиям работы активной зоны аппарата ВК-500: отчёт о НИР / НПО «Энергия», ЭНИН им. Г.М. Кржижановского. исполн.: Г.Г. Басова, М.П. Гашенко, И.Х. Колодцев и др. — Электрогорск, 1977. — 88 с. — Инв. № 4.164.*

### **Экспериментальное исследование теплогидродинамических процессов и параметров вибрации встроенного парогенератора ВК-500**

*Отв. исполнители: инженеры В.Л. Мухачёв, Т.В. Карпова, Ж.С. Струневская (ЭНИС НПО «Энергия»), инженер В.В. Винокуров (НПО «Энергия»); исполнители: канд. техн. наук Э.А. Захарова (ЭНИН), инженер В.Е. Макаров, В.Е. Серов (НПО «Энергия»)*

На стенде, представляющем собой модель реактора ВК-500 с полномасштабной (по высоте) моделью встроенного парогенератора, проведен первый этап работы, посвящённый исследованию паропроизводительно-

сти парогенератора, перепадов давления по трактам контура естественной циркуляции и в каналах Фильда, а также температурного режима работы теплопередающих поверхностей модели встроенного парогенератора в следующем диапазоне изменения режимных параметров: давление в I контуре 6,1–10,0 МПа; давление во II контуре 3,8–6,5 МПа; расход среды в I контуре 1,52–1,70 кг/с; расход среды во II контуре 0,64–0,70 кг/с; мощность, подводимая к модели активной зоны 245–518 кВт.

*Экспериментальное исследование теплогидродинамических процессов и параметров вибрации встроенного парогенератора ВК-500: отчёт о НИР / НПО «Энергия»; исполн.: В.Л. Мухачёв, Т.В. Карпова, Ж.С. Струневская и др. — М., 1978. — 46 с. — Инв. № 3-4.180.*

### **Экспериментальная отработка элементов сепарирующих устройств реактора ВК-500**

*Отв. исполнители: инженер В.И. Белов (ЭНИС НПО «Энергия»), канд. техн. наук В.К. Сафонов, инженер А.Г. Мончинский (предприятие п/я А-7291), исполнители — инженер В.Д. Байнякшин (ЭНИС), инженер В.Б. Карасёв*

Экспериментально отработаны элементы сепарирующих устройств с целью определения их влияния на эффективность работы жалюзийного сепаратора и выбора оптимальной конструкции. Испытания проводились при давлении 7 МПа (частично 5 и 3 МПа) в диапазоне изменения скоростей пара на входе в жалюзи ( $W_{\text{ж}}$ ) 0,3–1,3 м/с и значениях начальной влажности пара ( $\omega_{\text{вх}}$ ) 2–30%.

*Экспериментальная отработка элементов сепарирующих устройств реактора ВК-500: отчёт о НИР / НПО «Энергия», предприятие п/я А-7291; исполн.: В.И. Белов, В.К. Сафонов, А.Г. Мончинский и др. — Электрогорск, 1978. — 44 с. — Инв. № 5.173*

### **Экспериментальное обоснование инжекторной системы локализации аварий на АТЭЦ с реактором ВК-500**

*Руководитель темы канд. техн. наук В.А. Башилов (ВНИИАЭС); отв. исполнители: инженер А.Г. Толмачёв (ЭНИС), канд. техн. наук В.Н. Майданик, инженер В.Д. Булынин (ВНИИАЭС)*

На созданной экспериментальной установке, моделирующей условия аварии с потерей теплоносителя на АЭС с реактором ВК-500, проведена экспериментальная работа по исследованию системы локализации аварий на АЭС, включающая исследование работы основного элемента системы локализации — парожидкостного инжектора в нестационарных условиях и исследование системы в целом.

Исследования проводились при начальном давлении насыщенного пара и паровоздушной смеси на входе в инжектор равным 0,2–0,27 МПа и температуре охлаждающей жидкости до 30 °С.

Исследовано влияние геометрических параметров на конденсацию пара в инжекторе и показано влияние воздуха на работу системы в целом.

В представленных результатах работы показано, что в широком диапазоне типоразмеров инжектора в системе наблюдалась полная конденсация поступающего в неё пара. Однако, ни в одном опыте инжектор не давал напора, что не даёт возможности на основании данных опытов рекомендовать замкнутую схему для реализации системы локализации на АЭС с возвратом воздуха из ловушки в герметичный бокс, применительно к ВК-500.

Предложена для экспериментальной проверки барботажная схема локализации аварий для реактора ВК-500 с применением инжектора.

*Экспериментальное обоснование инжекторной системы локализации аварий на АТЭС с реактором ВК-500: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. В.А. Башилов; исполн.: А.Г. Толмачёв, В.Н. Майданик, В.Д. Бульнин. — Электрогорск, 1979. — 33 с. — Инв. № 3.196.*

### **Струйный циркуляционный насос для парогенератора ВК-500 (технический проект)**

*Отв. исполнитель инженер Г.В. Осокин; исполнители: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко, инженеры В.Д. Байнякшин, В.Ф. Домрин, Ю.С. Орешков (ЭНИС), канд. техн. наук Н.М. Зингер (СКБ ВТИ), инженер А.Н. Куклин, канд. техн. наук Э.К. Карасёв (предприятие п/я А-7291)*

Отмечается, что работа выполнена в соответствии с планом НИР и ОКР по обоснованию технического проекта парогенератора реактора ВК-500 и является продолжением работы, начатой СКБ-ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского в эскизном проекте струйного циркуляционного насоса (СЦН) Т350 ЭП. В проекте разработана конструкция струйного насоса, обеспечивающего необходимую циркуляцию среды второго контура парогенератора реактора ВК-500. Струйный насос устанавливается вертикально в центральной опускной трубе и работает последовательно с контуром естественной циркуляции. Проект разработан лабораторией гидродинамических испытаний и конструкторско-технологическим отделом ЭНИС по техническому заданию СКБ ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского и экспериментально обоснован исследованиями модели СЦН, проведёнными на пароводяном стенде ЭНИС.

*Струйный циркуляционный насос для парогенератора ВК-500 (технический проект): расчётно-пояснительная записка / ЭНИС ВНИИАЭС; исполн.: Г.В. Осокин, Л.К. Тихоненко, В.Д. Байнякшин и др. — Электрогорск, 1980. — 18 с. — Инв. № 29/80.*

### **Экспериментальное исследование теплогидравлических процессов встроенного парогенератора ВК-500 (прямотрубная модель)**

*Исполнители: инженер Ж.С. Струневская, техник Г.С. Сафронова (ЭНИС), инженер В.В. Винокуров (ВНИИАЭС), канд. техн. наук Э.А. Захарова, В.Е. Серов (ЭНИН)*

Выполнен комплекс работ по экспериментальному исследованию теплогидравлических процессов на двух моделях встроенного парогенератора

и элементах первого контура. Испытания проводились в ЭНИС на стенде, представляющем собой модель реактора ВК-500 с полномасштабной по высоте моделью встроенного парогенератора при режимных параметрах, близких к штатным.

Установлено, что паропроизводительность исследованной модели встроенного парогенератора (МВП) близка к расчетной; в режимах, близких к номинальным, не обнаружены потери теплогидравлической устойчивости в I и II контурах модели.

Величины перепадов давления по I контуру не зависят от мощности, подводимой к МВП и от температуры теплоносителя I контура на входе в модель активной зоны.

Получены опытные данные, свидетельствующие о захвате пара в опускной участок циркуляционного контура.

Отработана методика ввода неконденсирующихся газов в контур высокого давления.

Выполнено сопоставление теплогидравлических характеристик исследованных моделей.

*Экспериментальное исследование теплогидравлических процессов встроенного парогенератора ВК-500 (прямотрубная модель): отчет о НИР / ЭНИС ВНИИ АЭС; исполн.: Ж.С. Струневская, Г.С. Сафронова, В.В. Винокуров и др. — Электрогорск, 1980. — 71 с. — Инв. № 23.212.*

## Работы применительно к РУ специального назначения

### **Коррозионные свойства сплава ХН40Б и стали 0Х18Н10Т в водной среде, содержащей хлорид железа, при действии механических напряжений и наличии теплопередачи**

*Руководитель темы канд.техн.наук К.А. Несмеянова (ЭНИИ), канд. техн. наук А.М. Гришин (предприятие п/я Р-6575); отв. исполнители: инженер В.А. Гашенко (ЭИЛ), инженер В.И. Касаткин (ЭНИИ), инженеры Ю.В. Кондршин, Н.Н. Смирнова (предприятие п/я Р-6575)*

Приведена разработанная конструкция стенда для проведения испытаний стойкости сталей против коррозионного растрескивания (КР) в водных растворах хлорида железа в условиях теплопередачи от перегретого пара к воде. Стенд состоит из двух частей: прямоточной, высокого давления ( $P=100$  атм,  $t_1=560$  °С) и циркуляционной низкого давления ( $P=10$  атм,  $t_3=179$  °С). Представлены результаты выполненных испытаний стали 0Х18Н10Т и сплава ХН40Б при содержаниях в среде контура низкого давления хлорид-иона 0,5; 50 мг/л и кислорода около 20 мг/л. Испытания проведены на плоских (ненагруженных) образцах и тубчатых, подверженных воздействию растягивающих механических и термических напряжений ( $s_{сум}$  до 17 кг/мм<sup>2</sup>). Отмечается, что подтверждены известные данные о транскристаллитном характере КР стали 0Х18Н10Т в условиях воздействия

на нее воды и насыщенного пара, содержащих хлориды и кислород. Сплав ХН40Б обладает в этих условиях повышенной стойкостью против КР. Химический анализ отложений на поверхности трубчатых образцов выявил наличие в них хлорид-ионов.

*Коррозионные свойства сплава ХН40Б и стали 0Х18Н10Т в водной среде, содержащей хлорид железа, при действии механических напряжений и наличии теплопередачи: отчет о НИР / ЭИЛ, ЭНИН, Г.М. Кржижановского, предприятие п/я Р-6575; рук.: К.А. Несмеянова, А.М. Гришин; исполн.: В.А. Гашенко, В.И. Касаткин, Ю.В. Кондршин, Н.Н. Смирнова. — Электрогорск, 1971. — 40 с. — Инв. № 31.215.*

### **Анализ и обобщение опытных данных по кризису теплоотдачи в пучках твэлов трёхгранного профиля**

*Исполнители: инженеры Е.В. Столяров (ЭИЛ), Е.В. Коршунов (предприятие п/я Р-6575)*

В работе представлены полученные на стенде ЭИЛ Главатомэнерго результаты выполненных экспериментальных исследований кризиса теплоотдачи в пучках твэлов трёхгранного профиля при аксиальном тепловыделении.

*Анализ и обобщение опытных данных по кризису теплоотдачи в пучках твэлов трёхгранного профиля: отчёт о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, предприятие п/я Р-6575; исполн.: Е.В. Столяров, Е.В. Коршунов. — Электрогорск, 1971. — 76 с.*

### **Исследование коррозии специальных нержавеющих сталей в динамических условиях**

*Руководители темы: канд. техн. наук К.А. Несмеянова (ЭНИН), канд. техн. наук В.Л. Богоявленский (предприятие п/я Р-6575); отв. исполнители: инженеры В.А. Гашенко (ЭИЛ), В.И. Касаткин (ЭНИН), А.П. Шевцов (предприятие п/я Р-6575); исполнители: инженеры В.Г. Касаткина, А.А. Хохонова (ЭИЛ), инженеры Н.А. Лазарева, В.А. Покладок (предприятие п/я Р-6575)*

Представлены результаты исследования общей коррозии различных марок специальных нержавеющих сталей аустенитного класса в потоке воды высоких параметров ( $P = 102$  бар,  $t = 280$  °С). По коррозионной стойкости все испытанные стали марок ЭП-337, ЭП-717, ЭИ-844 и ЭИ-844Б могут быть отнесены к группе совершенно стойких материалов по шкале коррозионной стойкости (ГОСТ 5272-50).

Наибольшую коррозионную стойкость в этих условиях показала сталь ЭИ-844Б вакуумно-дугового переплава. Менее коррозионностойкими оказались стали марок ЭП-337, ЭП-717, ЭИ-844.

*Исследование коррозии специальных нержавеющих сталей в динамических условиях: отчёт о НИР / ЭИЛ, ЭНИН им Г.М. Кржижановского, предприятие п/я Р-6575; рук.: К.А. Несмеянова, В.Л. Богоявленский; исполн.: В.А. Гашенко, В.И. Касаткин, А.П. Шевцов и др. — Электрогорск, 1971. — 37 с. — Инв. № 84.*

### **Экспериментальные исследования критических тепловых потоков в трубах с завихрителями**

*Исполнители: инженеры А.Ф. Чалых (ЭИЛ), Р.И. Созиев, С.В. Изотов (ЭНИН), А.Н. Рябов (предприятие п/я А-7291)*

Представлены результаты очередного этапа экспериментального исследования критических тепловых нагрузок парогенерирующих каналов, охлаждаемых закрученным на входе в участок потоком воды, в диапазоне  $P=60-140$  ата и  $\rho_w=400-30000$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

*Экспериментальные исследования критических тепловых потоков в трубах с завихрителями: отчет о НИР/ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я А-7291; исполн.: А.Ф. Чалых, Р.И. Созиев, С.В. Изотов, А.Н. Рябов. — Электрогорск, 1971. — 19 с. — Инв. № 788.*

### **Экспериментальное исследование кризиса теплоотдачи в пучках имитаторов шестилопастных твэлов**

*Исполнители: инженеры Н.А. Коняхина, Е.В. Столяров (ЭИЛ); инженеры Е.В. Коршунов, М.И. Солонин (предприятие п/я Р-6575)*

В работе приведены результаты экспериментальных исследований кризиса теплоотдачи при принудительном течении теплоносителя в каналах с трехстержневыми пучками имитаторов шестилопастных твэлов. При равномерном по длине канала тепловыделении исследовано влияние на критические условия режимных параметров теплоносителя и некоторых различий в геометрических характеристиках имитаторов и в схемах упаковки их в канале.

Всего выполнено 307 опытов. Исследования проводились при  $P=70-190$  ата,  $\Delta i_{\text{вх}}=20-200$  ккал/кг,  $\rho_w=800-3700$  кг/м<sup>2</sup>·с.

*Экспериментальное исследование кризиса теплоотдачи в пучках имитаторов шестилопастных твэлов: отчет о НИР/ЭИЛ Главтомяэнерго, предприятие п/я Р-6575; исполн.: Н.А. Коняхина, Е.В. Столяров, Е.В. Коршунов, М.И. Солонин. — Электрогорск, 1972. — 37 с. — Инв. № 166.*

### **Экспериментальное исследование гидродинамики и температурного режима в стержневых сборках твэлов специального профиля**

*Исполнители: инженер Е.М. Ставиский, Г.Г. Круглихина*

Представлены результаты по изученным режимам течения воздуховодной смеси в горизонтальной трубе и шестистержневой сборке имитаторов твэлов крестообразного профиля в широком диапазоне изменения параметров, а также исследованного объёмного паросодержания ( $\varphi$ ) адиабатного пароводяного потока в трубах и сборке рассматриваемой геометрии при различной ориентации их в пространстве для  $P=30-99$  бар;  $\rho_w=500-2500$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $q=0,5-1,1$  МВт/м<sup>2</sup>;  $\beta=0-1$ .

*Экспериментальное исследование гидродинамики и температурного режима в стержневых сборках твэлов специального профиля: отчёт о НИР/ЭИЛ, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Е.М. Ставиский, Г.Г. Круглихина. — М., 1972. — 100 с. — Инв. № 793.*

**Анализ кризиса теплоотдачи в каналах с кольцевыми твэлами**

*Исполнители: инженеры А.Ф. Чалых, Г.И. Манойленко (ЭИЛ), канд. техн. наук Ф.Т. Каменьщиков, инженер В.В. Перемыщев (предприятие п/я А-7291)*

Получены экспериментальные данные по кризису теплоотдачи и гидравлическому сопротивлению в гладком кольцевом канале при внутреннем и равномерном по длине тепловыделении. Кольцевой канал представлял собой укороченную модель натурального поперечного сечения наружной кольцевой щели технологического канала реактора типа ВМ-2А. Исследования по кризису теплоотдачи проведены при  $\rho_w=1000-3000$  кг/(м<sup>2</sup>·с) и  $P=98-196$  бар. Температура воды на входе в кольцевой канал изменялась в пределах от 87 до 346 °С. Получены также данные по исследованию зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса.

*Анализ кризиса теплоотдачи в каналах с кольцевыми твэлами: отчёт о НИР/ЭИЛ, предприятие п/я А-7291; исполн.: А.Ф. Чалых, Г.И. Манойленко, Ф.Т. Каменьщиков, В.В. Перемыщев. — Электрогорск, 1978. — 152 с. — Инв. № 685.*

**Стендовые испытания стали 03Х16Н15М3Б в воде высоких параметров при воздействии теплового потока и механических напряжений**

*Руководитель темы канд. техн. наук В.Л. Богоявленский (предприятие п/я Р-6575); отв. исполнители: В.А. Гашенко (ЭНИС), А.П. Шевцов, В.С. Кропачёв (предприятие п/я Р-6575)*

Проведены испытания аустенитной нержавеющей стали 03Х16Н15М3Б на стойкость её к коррозионному растрескиванию (КР) в воде высоких параметров ( $P=100$  бар,  $T=280$  °С), содержащей 6–8 мг/кг хлоридов при наличии теплообмена при действии двухосных растягивающих напряжений. Проверено влияние на устойчивость стали против КР в указанных условиях концентрации в воде кислорода и выявлено ингибирующее действие различных концентраций фосфат-иона. Показано, что уменьшение концентрации кислорода в воде в этих условиях повышает устойчивость стали к КР.

*Стендовые испытания стали 03Х16Н15М3Б в воде высоких параметров при воздействии теплового потока и механических напряжений: отчёт о НИР/ЭНИС НПО «Энергия», предприятие п/я Р-6575; рук. В.Л. Богоявленский; исполн.: В.А. Гашенко, А.П. Шевцов, В.С. Кропачёв. — 1978. — 27 с.*

**Исследование жаростойкости стали 09Х16Н15М3Б (ЭИ-847) и сплава ХН40М5Б (ЭП-753) в потоке перегретого пара при температуре 600 °С, давлении 8,8 МПа, скорости потока 20 м/с**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.М. Гришин; отв. исполнители: Ю.В. Кондрашин (предприятие п/я Р-6575), инженер Н.М. Александрова (ЭНИН), инженер Г.С. Полякова (ЭНИС ВНИИАЭС)*

По результатам испытаний отмечено различие коррозионной стойкости стали и сплава с травленной и электрополированной поверхностью. Выявлено, что наиболее интенсивно протекает окисление материалов с

электрополированной поверхностью. Изучена прочность связи оксидных слоев с металлом. Средняя скорость отделения оксидной пленки от металла у стали ЭИ-847 на порядок выше, чем у сплава ЭП-753.

*Исследование жаростойкости стали 09Х16Н15М3Б (ЭИ-847) и сплава ХН40М5Б (ЭП-753) в потоке перегретого пара при температуре 600 °С, давлении 8,8 МПа, скорости потока 20 м/с: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я Р-6575; рук. А.М. Гришин; исполн.: Ю.В. Кондрашин, Н.М. Александрова, Г.С. Полякова. — Электрогорск, 1979. — 28 с. — Инв. № 6.190.*

### **Исследование виброакустических характеристик циркуляционных термонасосов**

*Исполнители: канд. техн. наук Э.К. Карасёв, канд. техн. наук В.В. Вазингер, инженер А.Р. Минасян (предприятие п/я А-7291), адъюнкт Ю.Г. Евсеенков, Ю.Д. Куцев (от ВВМИОЛУ им. Ф.Э. Дзержинского), инженер Е.И. Трубкин (ЭНИС ВНИИАЭС)*

Представлены результаты экспериментальных исследований виброакустических характеристик циркуляционных термонасосов. Определены интегральные уровни шума и вибрации, а также частоты дискретных составляющих в спектрах шума и вибрации термонасоса. Выявлено влияние режимных параметров на уровни шума и вибрации. На основании выполненных исследований даны рекомендации по дооборудованию стенда для снятия виброакустических характеристик термонасосов.

*Исследование виброакустических характеристик циркуляционных термонасосов: отчёт о НИР / предприятие п/я А-7291, ВВМИОЛУ им. Ф.Э. Дзержинского; исполн.: Э.К. Карасёв, В.В. Вазингер, А.Р. Минасян и др. — 1980. — 35 с. — Инв. № 53.*

### **Работы исследовательско-поискового характера в части изучения теплогидравлических процессов в элементах ЯЭУ**

#### **Экспериментальное исследование поперечного переноса теплоносителя в модели ячеек стержневых сборок**

*Отв. исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачёв (ЭИЛ), канд. техн. наук И.С. Дубровский (ЭНИН); исполнители: Ж.С. Струневская (ЭИЛ); канд. техн. наук В.А. Ефимов, инженер Б.Н. Корольков (ЭНИН)*

Отмечается, что при проектировании и анализе работы ядерных реакторов с жидкостным охлаждением рассчитываются, в числе прочих теплогидравлических характеристик, потеря давления  $\Delta P$ , истинное объёмное паросодержание  $\phi$ , температуры ТВЭЛ и запас до кризиса теплоотдачи, определяемый значением критического теплового потока  $q_{кр}$ .

Сборки тепловыделяющих стержней (ТВС) обладают той особенностью, что скорости и энтальпии теплоносителя могут быть неодинаковыми в разных ячейках проходного сечения в силу их теплогидравлической неравно-

ценности. Поэтому расчёты лишь усреднённых по сечению характеристик потока, более простые по сравнению с расчётами локальных характеристик, часто неприемлемы, особенно для «кипящих» реакторов.

Для успешных расчётов необходимо иметь надёжные универсальные закономерности поперечного турбулентного массо и теплообмена между потоками в ячейках, характеристики поперечного «потока расширения» (структуры, паросодержания, направления) и знать характер взаимодействия поперечных турбулентных пульсаций и «потока расширения».

Состояние исследований указанных закономерностей характеризуется значительными и возрастающими усилиями при пока скромных результатах.

В работе приведены опытные данные по объёмным расходным газосодержаниям поперечного потока через межстержневой зазор, полученные методом отсоса среды из канала, имитирующего ячейку стержневой сборки.

Опыты проводились с двумя экспериментальными каналами сечением  $(10 \times 10)$  мм и  $(20 \times 20)$  мм в следующем диапазоне изменения режимных параметров аксиального потока: давление  $(1,5 \div 2) \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>, массовая скорость  $(500 \div 3000)$  кг/м<sup>2</sup>·с, объёмное расходное газосодержание  $(0,15 \div 0,75)$ .

*Экспериментальное исследование поперечного переноса теплоносителя в модели ячеек стержневыхборок: отчёт о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; исполн.: А.Г. Лобачёв, И.С. Дубровский, Ж.С. Струневская и др. — Электрогорск, 1972. — 67 с. — Инв. № 17.*

### **Исследование гидродинамики неравновесного двухфазного потока**

*Научный руководитель темы д-р техн. наук Д.А. Лабунцов (ЭНИИ);*

*отв. исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачёв,*

*инженер А.И. Борисова (ЭИЛ); канд. техн. наук Э.А. Захарова,*

*Б.А. Кольчугин (ЭНИИ)*

В работе приведены опытные данные по истинным объёмным паросодержаниям при подъёмном движении неравновесного двухфазного потока в обогреваемой трубе внутренним диаметром 12,1 мм. Диапазон режимных параметров составлял: давление  $P=20 \div 70$  бар; скорость циркуляции  $W_0=0,5 \div 4,0$  м/с; плотность теплового потока  $q=0,30 \div 1,2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>; относительные энтальпии потока на входе в экспериментальный участок  $(\Delta i/r)_{вх}=-0,3 \div -0,02$ .

Приведены также полученные в эксперименте данные о влиянии входных параметров потока на развитие паросодержания и закономерности конденсации паровой фазы в неравновесных условиях и в необогреваемой трубе  $\varnothing 12,1$  мм.

*Исследование гидродинамики неравновесного двухфазного потока: отчёт о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук. Д.А. Лабунцов; исполн.: А.Г. Лобачёв, А.И. Борисова, Э.А. Захарова, Б.А. Кольчугин. — М., 1973. — 55 с. — Инв. № 98.*

### **Исследование конденсации пара в потоке недогретой жидкости при опускном движении**

*Отв. исполнители: канд. техн. наук Э.А. Захарова, Б.А. Кольчугин, И.Т. Серов (ЭНИН), инженер А.И. Борисова (ЭИЛ)*

Приведены результаты экспериментального исследования гидродинамики опускного движения двухфазного неравновесного потока в трубе внутренним диаметром 30 мм. Диапазон режимных параметров составлял: давление  $P=30; 50; 70$  бар; скорость циркуляции  $w_0=0,25\div 1,0$  м/с;  $\Delta t_n$  — недогрев до температуры насыщения на входе из экспериментального участка  $0\div 15$  °С; плотность теплового потока на обогреваемом участке  $0,3; 0,6$  МВт/м<sup>2</sup>.

*Исследование конденсации пара в потоке недогретой жидкости при опускном движении: отчет о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Э.А. Захарова, Б.А. Кольчугин, И.Т. Серов, А.И. Борисова. — М., 1974. — 49 с. — Инв. № 116.*

### **Экспериментальное исследование гидродинамики неравновесного двухфазного потока и температурного режима ТВЭЛ в пучках цилиндрических стержней с различной теплогидравлической неравноценностью ячеек**

*Исполнители: канд. техн. наук И.С. Дубровский (ЭНИН), инженеры В.Л. Мухачев, Ж.С. Струневская (ЭИЛ), инженер Б.М. Корольков (ЭНИН)*

Приводятся опытные данные по истинному объёмному паросодержанию, потерям давления на трение и температурному режиму ТВЭЛ в пучках цилиндрических стержней. Опыты проводились в плане продолжения цикла работ по исследованию влияния теплогидравлической неравноценности ячеек пучка на гидродинамику потока.

Диапазон исследованных режимных параметров составлял: давление  $50\div 125$  бар, массовая скорость  $500\div 2000$  кг/м<sup>2</sup>·с, плотность теплового потока  $0,4\div 0,8$  МВт/м<sup>2</sup>, относительная энтальпия теплоносителя  $-0,3\div 0,15$ .

*Экспериментальное исследование гидродинамики неравновесного двухфазного потока и температурного режима твэл в пучках цилиндрических стержней с различной теплогидравлической неравноценностью ячеек: отчет о НИР / ЭИЛ Главатомэнерго, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: И.С. Дубровский, В.Л. Мухачев, Ж.С. Струневская, Б.М. Корольков. — Электрогорск, 1974. — 83 с. — Инв. № 292.*

### **Экспериментальное исследование влияния масштабных факторов на критическое истечение насыщенной и недогретой воды из прямых труб**

*Исполнители: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко, инженеры С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин (ЭНИС НПО «Энергия»), канд. техн. наук Л.Р. Кеворков (ИАЭ)*

Представлены результаты исследования характеристик потока горячей воды в трубах с острой входной кромкой диаметром 25 мм и длиной от 100

до 1200 мм, а также опытов на трубе со скругленной входной кромкой, на диафрагмах диаметром 14 и 25 мм и на трубе, на входе в которую установлено сопло Лавала с профилем, соответствующим профилю входной струи. Опыты проведены в диапазоне начальных давлений от 3 до 90 кг/см<sup>2</sup>, начальных температур воды от 100 °С до  $t_s$  и относительных противодавлений от 0,9 до 0,01.

Представлены также опытные данные по величинам расходов, распределению статических давлений по длине труб и по локальным значениям средних истинных паросодержаний потока. Показано, что критические условия в трубах с острой входной кромкой определяются сжатием входной струи. Критическое течение характеризуется неравновесностью фазовых переходов как в отношении парообразования, так и в отношении конденсации образующегося пара. Округление входной кромки приводит к возрастанию величины критического расхода и к увеличению неравновесности течения.

Предложены эмпирические соотношения для расчета величин удельного критического расхода горячей воды из труб с острой входной кромкой. Соотношения рекомендуются для использования в следующем диапазоне параметров: относительная длина труб  $\geq 6$ , диаметр  $\geq 3,5$  мм, начальное давление  $3 \div 150$  кг/см<sup>2</sup>, начальная температура воды от 100 °С до  $t_s$ .

*Экспериментальное исследование влияния масштабных факторов на критическое истечение насыщенной и недогретой воды из прямых труб: отчет о НИР /НПО «Энергия», ИАЭ им. И.В. Курчатова; исполн.: Л.К. Тихоненко, С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин, Л.Р. Кеворков. — Электрогорск, 1976. — 113 с. — Инв. № 149.*

## **Экспериментальное исследование аварийных режимов на кольцевом канале**

*Отв. исполнители: инженер Е.И. Кухтенкова (ЭНИС), канд. техн. наук Е.М. Ставиский (ЭНИН), инженер Г.И. Савватимский (ИАЭ); исполнители: инженер И.В. Ёлкин (ЭНИН), Г.И. Белоусов (ИАЭ)*

В работе представлены результаты экспериментального исследования теплогидравлической обстановки в испарительном канале при перерыве в подаче теплоносителя с последующим восстановлением его расхода.

Опыты выполнены на кольцевом канале с электрообогреваемой внутренней трубкой диаметром  $16 \times 1$  мм (обогреваемая длина  $Z_{об} = 3$  м, материал 1Х18Н9Т) и необогреваемой обечайкой внутренним диаметром 22 мм, в диапазоне режимных параметров: давление  $P = 3 \div 11,9$  МПа, массовая скорость  $\rho W = 700 \div 2100$  кг/м<sup>2</sup>·с, плотность теплового потока  $q = 250 \div 850$  кВт/м<sup>2</sup>, недогрев воды на входе  $\Delta t_{н} = 25, 100$  °С, температура начала расхолаживания  $t_p = 300 \div 700$  °С. Отмечается, что комплексное измерение и осциллографирование тепловых и гидродинамических параметров позволили получить сведения о динамике процессов разогрева и расхолаживания кольцевого канала, о влиянии конструктивных особенностей канала на практически

важные параметры, такие как время возникновения кризиса теплообмена, скорости разогрева и обводнения канала, скорость фронта охлаждения.

*Экспериментальное исследование аварийных режимов на кольцевом канале: отчёт о НИР / ЭНИС НПО «Энергия», ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ИАЭ им. И.В. Курчатова; исполн.: Е.И. Кухтенкова, Е.М. Ставиский, Г.И. Савватимский и др. — Электрогорск, 1978. — 61 с. — Инв. № 3.176.*

### **Экспериментальное исследование истечения недогретой и насыщенной воды из коротких цилиндрических каналов с острой входной кромкой**

*Исполнители: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко, инженеры С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин, канд. техн. наук Л.Р. Кеворков (ИАЭ)*

Приводятся результаты экспериментального изучения характеристик потока горячей воды в коротких цилиндрических каналах  $d \ 10 \div 20$  мм ( $L/D = 0 \div 6$ ). Опыты проведены при начальных давлениях  $10 \div 90$  кг/см<sup>2</sup>, температурах воды на входе  $100 \text{ }^\circ\text{C} - t_s$  и противодавлениях до 1 кг/см<sup>2</sup>.

Отмечается, что на всех исследованных каналах достигнуты условия, при которых расход не зависит от противодавления, т.е критические условия.

Показано, что истечение через диафрагму по ряду признаков, например, по величине предельного или критического расхода, мало отличается от истечения через каналы некоторой конечной длины, но вместе с тем имеет особенности, которые заставляют в общем случае считать диафрагмой только канал с  $L/D=0$ .

Обнаружено существование переходной области длин, которой свойственно резкое изменение влияния входных параметров потока и длины канала на критический расход и продольную эпюру давлений.

Показано, что в исследованной области длин основным масштабным параметром, как и в случае длинных труб, является полная длина канала  $L$ . Вместе с тем, при малой длине канала выявлено некоторое влияние на критический расход и диаметра. Связь между величинами  $(\rho_w)_{кр}$ ,  $L$  и  $d$  является степенной, причем отношение показателей степеней при  $L$  и  $d$  примерно равно 5:1.

*Экспериментальное исследование истечения недогретой и насыщенной воды из коротких цилиндрических каналов с острой входной кромкой: отчет о НИР / НПО «Энергия»; исполн.: Л.К. Тихоненко, С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин, Л.Р. Кеворков. — Электрогорск, 1978. — 48 с. — Инв. № 1.168.*

### **Исследование аварийных режимов тепловыделяющего канала при атмосферном давлении**

*Исполнители: инженеры Э.И. Ливерант, И.В. Елкин, инженер Л.П. Ершова*

Представлены экспериментальные данные о динамике изменения температурного режима и гидродинамической обстановке в канале в условиях, имитирующих разрыв подводящего или отводящего коллекторов и последующее аварийное охлаждение.

Опыты выполнены на одиночной электрообогреваемой ветви полномасштабной модели испарительного канала из стали ОХ18Н9Т при атмосферном давлении, массовой скорости  $30 \div 490 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ , плотности теплового потока  $15 \div 250 \text{ кВт/м}^2$ , температуре охлаждающей воды  $20^\circ \text{С}$ . Исследовались время наступления кризиса теплоотдачи, скорость и температура разогрева канала, скорость продвижения фронта увлажнения. Проводилось осциллографирование основных режимных параметров, температуры стенки и перепадов давления по элементам канала. Представлена модель для расчета теплоотдачи в закризисной области.

*Исследование аварийных режимов тепловыделяющего канала при атмосферном давлении: отчет о НИР / НПО «Энергия», ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Э.И. Ливерант, И.В. Елкин, Л.П. Ершова. — Электрогорск, 1978. — 99 с. — Инв. № 4.179.*

### **Исследование аварийных режимов на семистержневом пучке**

*Отв. исполнители: инженер Т.В. Карпова (ЭНИС), инженер Е.М. Ставиский (ЭНИН), инженер Г.И. Савватимский (ИАЭ); исполнитель инженер Е.И. Кухтенкова (ЭНИС)*

Представлены результаты, экспериментального исследования: теплогидравлической обстановки в канале с семистержневым пучком имитаторов ТВЭЛ при перерыве в подаче теплоносителя. Тепловыделяющие стержни с диаметром  $12 \times 1$  и обогреваемой длиной  $Z_{\text{об}} = 3 \text{ м}$ , устанавливались в необогреваемом корпусе внутренним диаметром  $45 \text{ мм}$ . Опыты выполнены в следующем диапазоне режимных параметров: давление  $P = 37 \text{ МПа}$ , массовая скорость  $\rho_w = 700 \sim \div 2000 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ , плотность теплового потока  $q = 250 \div 500 \text{ кВт/м}^2$ , недогрев воды на входе  $\Delta t_{\text{н}} = 25^\circ \text{С}$ .

Отмечается, что полученные опытные данные по динамике процессов разогрева и расхолаживания стержневого канала, позволяют судить об условиях и времени возникновения кризиса теплоотдачи, скорости разогрева и обводнения канала, скорости продвижения фронта охлаждения. Выявлены характер влияния конструктивных особенностей канала, присущих сборкам ТВЭЛ, на процесс обезвоживания, кризисного разогрева и последующего расхолаживания канала, дана расчетная рекомендация ряда важных характеристик исследуемого процесса.

*Исследование аварийных режимов на семистержневом пучке: отчет о НИР / ЭНИС НПО «Энергия», ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ИАЭ им. И.В. Курчатова; исполн.: Т.В. Карпова, Е.М. Ставиский, Г.И. Савватимский, Е.И. Кухтенкова. — Электрогорск, 1979. — 72 с. — Инв. № 3.184.*

## **Исследование торовых сепараторов**

*Отв. исполнители: инженеры В.И. Белов (ЭНИС),*

*В.К. Сафонов (предприятие п/я А-7291);*

*исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Е.А. Лобачёва, техники Морозова*

*Е.А., Р.А. Самигулина (ЭНИС), канд. техн. наук И.Т. Серов,*

*В.Б. Карасёв (предприятие п/я А-7291)*

Приведены результаты экспериментальной проверки работоспособности моделей торового сепаратора при давлении 5,0 МПа, (частично при 3 и 7 МПа) в диапазоне паровых нагрузок 1,2–5,0 т/ч и влажности пара на входе в сепаратор  $\omega_1 = 7 \div 65\%$ . Генерация влажного пара осуществлялась с помощью двухступенчатого центробежного сепаратора. Испытаны сепараторы шести модификаций, отличающихся конструкциями узлов ввода влажного пара в сепаратор, отвода отсепарированного пара и воды из сепаратора.

Показано, что некоторые варианты конструкций этих узлов позволяют повысить эффективность торового сепаратора.

*Исследование торовых сепараторов: отчёт о НИР/ ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: В.И. Белов, В.К. Сафонов, В.Д. Байнякшин и др. — Электротехнический институт, 1980. — 38 с. — Инв. № 11.206.*

# НИОКР ЭИЛ–ЭНИС ВНИИАЭС 1981–1990 гг.

## Работы применительно к ВВЭР

### **Исследование характеристик струйного и вихревого инжекторов применительно к системе снижения давления в системе локализации аварии на АЭС с потерей теплоносителя первого контура**

*Исполнители: инженер А.Г. Толмачев (ЭНИС), инженер В.Д. Булынин, канд. техн. наук В.Н. Майданик, А.И. Сафонов (ОКБ «Горизонт»); инженеры В.П. Косенко, Е.Ю. Лабинская, А.С. Казановский (ОКБ «Горизонт»)*

На специально созданной в ЭНИС экспериментальной установке проведены исследования работы струйного и вихревого инжекторов применительно к системе снижения давления в системе локализации аварии на АЭС с потерей теплоносителя. Опыты проводились при давлении паровоздушной смеси на входе 0,1–0,17 МПа, процентном составе воздуха от 0 до 70, температуре охлаждающей воды от 20 до 80 °С. Предложена методика расчёта струйного инжектора и показано её сравнение с экспериментом.

Приводятся результаты экспериментов показавшие, что оба инжектора обеспечивали циркуляционный расход охлаждающей воды и скорость конденсации достаточные для полной конденсации поступающего пара во всем исследованном диапазоне входных параметров. Давление запуска для струйного инжектора составляло (при оптимальной геометрии) 0,115 МПа, а для вихревого инжектора наличие циркуляционного расхода охлаждающей воды отмечалось сразу после появления избыточного давления на входе. Циркуляционные характеристики вихревого инжектора улучшались при работе на паровоздушной смеси.

*Исследование характеристик струйного и вихревого инжекторов применительно к системе снижения давления в системе локализации аварии на АЭС с потерей теплоносителя первого контура: отчёт о НИР / ЭНИС, НПО «Энергия», ОКБ «Горизонт»; исполн.: А.Г. Толмачев, В.Д. Булынин, В.Н. Майданик и др. — Электрогорск, 1981. — 103 с. — Инв. № 23.226.*

### **Определение динамических характеристик при обрыве трубопровода полным сечением применительно к аварии АЭС с потерей теплоносителя**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.П. Прошутинский (ЭНИС); исполнители: инженер А.Г. Толмачев (ЭНИС), инженеры В.Д. Булынин, В.П. Косенко, канд. техн. наук В.Н. Майданик (ВНИИАЭС)*

На специально созданной модельной установке, обеспечивающей возможность исследования динамики поведения трубопровода при мгновенном

разрыве его полным сечением, проведены опыты: разрыв с начальным давлением 5–6 МПа и температурой 240 и 260 °С. Показано, что максимальная величина динамических усилий на опоре-амортизаторе в начальный момент значительно меньше принятой оценки усилий при проектировании опор-амортизаторов.

*Определение динамических характеристик при обрыве трубопровода полным сечением применительно к аварии АЭС с потерей теплоносителя: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. А.П. Прошутинский; исполн.: А.Г. Толмачев, В.Д. Булынин, В.П. Косенко, В.Н. Майданик — Электрогорск, 1983. — 36 с. — Инв. № 23.266.*

### **Экспериментальное обоснование применения струйного конденсатора в качестве рабочего элемента для системы локализации аварии на АЭС с потерей теплоносителя**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.П. Прошутинский (ЭНИС); исполнители: инженер А.Г. Толмачев (ЭНИС), инженеры В.Д. Булынин, В.П. Косенко, канд. техн. наук В.Н. Майданик (ВНИИАЭС)*

На специальной экспериментальной установке проведены динамические испытания крупногабаритного модуля струйного конденсатора на параметрах среды на входе в конденсатор близких к реальным аварийным условиям при больших (до 10 кг/с) и малых (0,5–0,15 кг/с) расходах пара на вход струйного конденсатора. Сравнение результатов динамических исследований крупногабаритного струйного конденсатора с малой моделью на данном этапе исследований не выявили влияния масштаба на его рабочие характеристики. Проведены статические испытания четырех моделей струйного конденсатора с целью дальнейшей оптимизации конструкции.

*Экспериментальное обоснование применения струйного конденсатора в качестве рабочего элемента для системы локализации аварии на АЭС с потерей теплоносителя: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. А.П. Прошутинский; исполн.: А.Г. Толмачев, В.Д. Булынин, В.П. Косенко, В.Н. Майданик. — Электрогорск, 1983. — 53 с. — Инв. № 23.258.*

### **Авария с «малой» течью: экспериментальное исследование на модели I контура ЯЭУ с водо-водяным реактором**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.П. Прошутинский (ЭНИС); исполнители: инженеры М.П. Гашенко, Л.П. Ершова (ЭНИС), канд. техн. наук И.В. Елкин, инженеры В.Р. Живов, А.П. Никонов, Р.К. Ясновский, А.Ю. Чуканцев (ИАЭ им. И.В. Курчатова)*

На спроектированной и изготовленной экспериментальной установке, имитирующей циркуляционный контур ЯЭУ с водо-водяным реактором выполнено экспериментальное исследование теплогидравлических процессов при имитации аварии с «малой» течью теплоносителя. Диапазон изменения режимных параметров составил:

- начальное давление — до 13 МПа,
- тепловая нагрузка — до 80 кВт/м<sup>2</sup>,

- расход воды по второму контуру – от 0 до 770 кг/ч,
- расход охлаждающей воды при имитации работы системы САОЗ – от 0 до 430 кг/ч.

Представлены результаты экспериментов по истечению теплоносителя из «холодного» и «горячего» трубопроводов через каналы истечения диаметром разрыва: 1.1, 2.2, 3.3, 4.4 мм ( $l/d=10$ ); 3.2 мм ( $l/d=1,7$ ); а также из канала типа сопло –  $d_{\min}=3.2$  мм.

Результаты выполненного расчета по программе RELAP4/MOD6 теплогидравлической обстановки в первом контуре при истечении из «холодного» трубопровода показали качественное совпадение с экспериментом.

Экспериментально подтверждена применимость квазистатического приближения при описании переходных процессов в первом контуре при аварии с течью.

Отмечается, что в ходе впервые выполненных в СССР подобных экспериментов получены данные по теплогидравлической обстановке в контуре циркуляции при имитации течи из «холодного» и «горячего» трубопроводов. Изучено влияние места и размера течи, места подачи охлаждающей воды и тепловой нагрузки на имитаторах твэлов. Получены аналитические зависимости для расчёта переходных процессов при анализе аварий с «малой» течью в квазистационарном приближении, которые удовлетворительно согласуются с опытными данными, а также формула для описания распределения истинного объемного паросодержания по высоте объёма с вскипающей водой, удовлетворительно согласующаяся с данными других авторов.

*Авария с «малой» течью: экспериментальное исследование на модели I контура ЯЭУ с водо-водяным реактором: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ИАЭ им. И.В. Курчатова; рук. А.П. Прошутинский; исполн.: М.П. Гашенко, Л.П. Ершова; И.В. Елкин и др. — Электрогорск, 1985. — 149 с. — Инв. № 21-22.319.*

### **Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик модели ТВС реактора ВВЭР в условиях частичного осушения активной зоны**

*Научный руководитель работы д-р техн. наук Б.И. Нигматулин (ЭНИС), отв. исполнитель инженер Г.И. Манойленко (ЭНИС); исполнители: инженер Г.Г. Басова (ЭНИС), инженер Е.Н. Виденеев (ВНИИАЭС)*

В модели (7-стержневой обогреваемой длиной 2,5 м) активной зоны реактора ВВЭР со свободным уровнем при режимных параметрах аварии с неконтролируемыми малыми течами теплоносителя в первом контуре исследованы теплогидравлические процессы и получены экспериментальные данные по температурным режимам и коэффициентам теплоотдачи в частично осушенной части канала при режимных параметрах: тепловые нагрузки ( $q$ ) 11–131 кВт/м<sup>2</sup>, массовые скорости ( $\rho w$ ) 1–58 кг/(м<sup>2</sup>·с), давление ( $P$ ) 0,3–3 МПа, положение массового уровня 0,3–0,6 обогреваемой высо-

ты. Полученные результаты позволяют уменьшить степень консерватизма при расчётном обосновании теплотехнической надёжности реакторной установки типа ВВЭР при авариях с малой течью теплоносителя I контура.

*Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик модели ТВС реактора ВВЭР в условиях частичного осушения активной зоны: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Б.И. Нигматулин; исполн. Г.И. Манойленко, Г.Г. Басова, Е.Н. Виденев. — Электрогорск, 1987. — 140 с. — Инв. № 2.339.*

## **Моделирование аварий с малой течью на АЭС с ВВЭР.**

### **Критерий подобия для интегральных стендов**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.П. Прошутинский;  
исполнитель инженер А.Ю. Сколкин*

Выполнен обзор существующих подходов к моделированию аварий с малой течью на интегральных стендах и выбраны параметры для создаваемой установки. Анализ показал, что наиболее применимым для моделирования является закон объёмного масштабного моделирования. Проведен расчёт геометрических характеристик трубопроводов двух перспективных интегральных стендов применительно к исследованиям для ВВЭР-1000.

*Моделирование аварий с малой течью на АЭС с ВВЭР. Критерий подобия для интегральных стендов: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. А.П. Прошутинский; исполн. А.Ю. Сколкин. — Электрогорск, 1987. — 46 с. — Инв. № 23.336.*

## **Экспериментальный теплофизический стенд для исследования переходных и аварийных режимов**

*Руководители работы: канд. техн. наук А.П. Прошутинский (ЭНИС), канд. техн. наук В.А. Силин (ИАЭ им. И.В. Курчатова);  
отв. исполнители: инженер М.П. Гашенко (ЭНИС), канд. техн. наук И.В. Елкин (ИАЭ им. И.В. Курчатова);  
исполнители: инженеры А.Ю. Сколкин, Н.Н. Фоминых, Л.П. Ершова, В.Ф. Домрин, Н.Т. Ефимов, Л.А. Иванов, О.Л. Лазарев, А.В. Столпник, Ю.С. Орешков, Л.М. Жура, И.В. Столпник (ЭНИС)*

Описан проект интегрального стенда безопасности (ИСБ-ВВЭР) предназначенного для исследования переходных и аварийных режимов применительно в АЭС с ВВЭР-1000, а также исследования теплообмена и гидродинамики в стационарных и нестационарных условиях при сверхкритических параметрах теплоносителя в I контуре. Масштаб стенда 1:3000.

Стенд ИСБ-ВВЭР имеет две петли с соотношением объемов петель 1:3 и рассчитан на следующие параметры:

I контур

- давление до 25 МПа
- температура воды до 400 °С
- расход воды через сборку имитаторов твэл до 9 кг/с
- электрическая мощность сборки имитаторов твэл — 1,8 МВт
- максимальная температура оболочки имитатора твэл — 1000 °С

**II контур**

- давление до 13 МПа
- температура питательной воды до 260 °С
- расход питательной воды на один ПГ до 3 кг/с

Для стенда ИСБ-ВВЭР разработана система сбора информации на основе комплекса ИВК-2.

Выполненный претестовый расчет стационарного состояния стенда по комплексу программ МОСТ показал удовлетворительное совпадение его основных характеристик с прототипом.

*Экспериментальный теплофизический стенд для исследования переходных и аварийных режимов: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ИАЭ им. И.В. Курчатова; рук. А.П. Прошутинский, В.А. Силин; исполн. М.П. Гашенко, И.В. Елкин, А.Ю. Скоккин и др. — Электрогорск, 1988. — 92 с. — Инв. № 3.349.*

### **Разработка и исследование задач контроля, управления и диагностики ВХР 2-го контура АЭС с ВВЭР**

*Отв. исполнитель инженер А.В. Ульянов;  
исполнитель инженер О.Н. Абакумова*

Представлена разработанная схема (первая очередь) водно-химического стенда — модели 2-го контура АЭС с ВВЭР-1000. Сформулировано его назначение. Дано описание работы и конструкции используемых нестандартизированных датчиков электрохимических методов контроля. Дана краткая характеристика автоматических и лабораторных методов химического контроля теплоносителя.

*Разработка и исследование задач контроля, управления и диагностики ВХР 2-го контура АЭС с ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; исполн.: А.В. Ульянов, О.Н. Абакумова. — Электрогорск, 1989. — 73 с. — Инв. № 162/89.*

### **Проведение электрохимических исследований материалов узлов заделки теплообменных труб в коллектор первого контура парогенератора ПГВ-1000**

*Научный руководитель работы д-р техн. наук Б.И. Нигматулин (ЭНИС);  
руководитель работы инженер И.Н. Горячкин (ЭНИС);  
исполнители: канд. техн. наук Ю.В. Мулёв (Институт повышения квалификации при ВПИ); инженер М.Г. Салтанов (ВНИИАЭС),  
лаборант О.П. Самарин (НИКИЭТ)*

Проведены электрохимические исследования в водных средах высоких параметров пяти видов наплавов (сплавы 0725Н13, ЭП-953 ВИ, ЭК-32, ЭП-855, 04Х20Н10Г2Б) в местах заделки трубных пучков в коллектор для выдачи заключения об электрохимической совместимости металла наплавов и теплообменных труб и невозможности возникновения контактной коррозии.

*Проведение электрохимических исследований материалов узлов заделки теплообменных труб в коллектор первого контура парогенератора ПГВ-1000: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук.: Б.И. Нигматулин, И.Н. Горячкин; исполн.: Ю.В. Мулёв, М.Г. Салтанов, О.П. Самарин. — Электрогорск, 1990. — 47 с. — Инв. № 4.376.*

### **Тестирование программы TRAC на экспериментальных установках**

*Руководитель работы, отв. исполнитель канд. физ.-мат. наук О.И. Мелихов (ЭНИС); отв. исполнитель канд. физ.-мат. наук К.И. Сопленков (ВНИИАЭС); исполнители: канд. физ.-мат. наук Я.Д. Ходжаев, инженеры Е.В. Павленко, И.И. Шмаль, С.И. Евдокимов, Г.А. Лобачев (ЭНИС), канд. техн. наук Б.Л. Канцырев (ВНИИАЭС)*

Выполнен анализ численных схем, лежащих в основе современных кодов, моделирующих нестационарные теплогидравлические процессы в переходных и аварийных режимах работы АЭС. На примере решения модельных задач показаны характерные особенности этих схем. Проведено тестирование программы TRAC на экспериментах ROSA-IV и 108 (ЭНИС), получено удовлетворительное согласование результатов расчёта с экспериментом.

*Тестирование программы TRAC на экспериментальных установках: отчёт о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС; рук. О.И. Мелихов; исполн.: К.И. Сопленков, Я.Д. Ходжаев, Е.В. Павленко и др. — Электргорск, 1990. — 75 с. — Инв. № 3.380.*

### **Integral Test Facility for VVER Safety Research (ITF–VVER)**

*Б.И. Нигматулин, О.И. Мелихов, М.П. Гашенко, А.П. Прошутинский, Н.Н. Фоминых, А.Г. Лобачев, А.Ю. Сколкин*

Представлено подробное описание созданного в ЭНИЦ уникального интегрального среднемасштабного теплофизического стенда ИСБ ВВЭР предназначенного для исследования теплогидравлических проблем безопасности водо-водяных реакторов типа ВВЭР-1000. Стенд ИСБ-ВВЭР — двухпетлевая крупномасштабная интегральная установка, структурно подобная первому контуру АЭС с реактором ВВЭР. Одна петля с парогенератором моделирует аварийную петлю реакторной установки. Другая петля стенда (тройная) с тремя парогенераторами моделирует три исправные петли. В обеих петлях установлены циркуляционные насосы. В состав стенда также входят модель компенсатора давления и модели трех независимых систем аварийного охлаждения активной зоны: САОЗ высокого давления, гидроемкостей и САОЗ низкого давления. Модель реактора включает в себя внешний опускной участок, модель активной зоны, верхнюю камеру смешения и байпасную секцию. Модель активной зоны представляет собой пучок имитаторов твэл (19 твэлов) с косвенным нагревом с суммарной максимальной мощностью 1,8 МВт. Представлены чертежи оборудования стенда со всеми геометрическими размерами оборудования — моделей основного технологического оборудования прототипа реактора ВВЭР и их подробное описание, а также все геометрические размеры элементов контура циркуляции стенда ИСБ ВВЭР, необходимые для составления нодализационной схемы стенда и его элементов при проведении верификационных расчетов. Стенд оснащен системой автоматизированного сбора научной информации (АСНИ) и системой контроля и управления (СКУ). Система АСНИ включает 128 измерительных каналов с частотой опроса 20 Гц и 200 каналов с частотой

опроса 1 Гц и приборами для измерения температур, давлений и перепадов давлений, электрических напряжения, тока и мощности.

Основные характеристики ИСБ ВВЭР:

- Теплоноситель вода
- Объемно-мощностной масштаб моделирования 1:3000
- Высотный масштаб моделирования 1:1
- Максимальная электрическая мощность 1,8 МВт
- Давление первого контура до 25 МПа
- Число циркуляционных петель 2
- Соотношение объемов петель 1:3
- Температура теплоносителя до 400 °С.

*B.I. Nigmatulin, O.I. Melihov, M.P. Gashenko et al. Integral Test Facility for VVER Safety Research (ITF-VVER). — М., 1990. — 60 с. — (Preprint IAE-5044/14.М., Kurchatov Institute of Atomic Energy)*

## Работы применительно к реактору АСТ-500

### Экспериментальное исследование коррозионной стойкости конструкционных материалов при повышенной концентрации кислорода применительно к атомной станции теплоснабжения АСТ-500

*Отв. исполнители: инженер О.Н. Абакумова (ЭНИС),*

*канд. техн. наук Е.Б. Мацкевич (ЭНИИ);*

*исполнители: инженер В.А. Гашенко (ЭНИС), канд. техн. наук*

*И.С. Дубровский (ЭНИИ), инженер Т.И. Малова (ИАЭ им. И.В. Курчатова)*

Представлены результаты коррозионных испытаний углеродистой стали перлитного класса (сталь 20), низколегированных сталей мартенситного класса (10ХН1М) и мартенситно-ферритного класса (08Х14МФ), хромомарганцевой стали аустенитно-ферритного класса (АС-9) и хромоникелевой стали аустенитного класса (1Х18Н10Т) при температуре 60, 150 и 200 °С и скорости потока 0; 0,4; 1 и 4 м/с в кислородсодержащем теплоносителе ( $C_{O_2} = 2-4$  мг/кг,  $\chi \sim 0,6$  мкСм/см) применительно к условиям РУ АСТ-500. Изучено влияние различных условий простоя на защитные свойства оксидных плёнок, формирующихся на стали 20 в потоках кислородсодержащей воды при температуре 60 и 150 °С. Выявлены стояночные режимы, не снижающие защитных свойств формирующихся на сталях оксидных плёнок. Дано заключение о возможности применения стали 20 в условиях конденсатно-питательного тракта РУ АСТ.

*Экспериментальное исследование коррозионной стойкости конструкционных материалов при повышенной концентрации кислорода применительно к атомной станции теплоснабжения АСТ-500: отчёт о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; исполн.: О.Н. Абакумова, Е.Б. Мацкевич, В.А. Гашенко и др. — Электрогорск, 1981. — 93 с. — Инв. № 31.221.*

### **Экспериментальное исследование сепарации и захвата пара в модели тройника промежуточного контура реактора АСТ-500**

*Исполнители: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко, инженер Г.В. Осокин,*

Получены опытные данные по сепарации и захвату пара в опуск модели тройника Ду 300 мм промежуточного контура реактора АСТ-500, выполненной в масштабе 1:2, при натуральных параметрах рабочей среды  $P=0,78 \div 1,57$  МПа;  $X_{\text{вх}}=0,5 \div 3\%$ .

*Экспериментальное исследование сепарации и захвата пара в модели тройника промежуточного контура реактора АСТ-500: протокол ЭНИС ВНИИАЭС / исполн.: Л.К. Тихоненко, Г.В. Осокин. — Электрогорск, 1982. — Инв. № 53/82.*

### **Экспериментальное исследование гидродинамики контура естественной циркуляции реактора АСТ-500**

*Отв. исполнители: инженер Г.В. Осокин (ЭНИС),*

*канд. техн. наук А.Г. Агеев, Б.А. Кольчугин (ЭНИИ);*

*исполнители: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко (ЭНИС),*

*канд. техн. наук В.П. Грицына, инженер О.Г. Бартоломей (ЭНИИ)*

Выполнено экспериментальное исследование модели контура естественной циркуляции реактора АСТ-500, изготовленного в виде сектора с углом раскрытия  $40^\circ$  (1/9 часть натурального аппарата с масштабом моделирования поперечных размеров 1:2, а вертикальных размеров 1:1) и с установленным в опускном канале модели элементом теплообменника с числом труб 540 шт.

*Экспериментальное исследование гидродинамики контура естественной циркуляции реактора АСТ-500: отчёт о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Г.В. Осокин, А.Г. Агеев, Б.А. Кольчугин и др. — Электрогорск, 1983. — 78 с. — Инв. № 12.265.*

### **Экспериментальные исследования устройств для уменьшения захвата пара в кольцевой опускной канал контура циркуляции**

*Руководитель работы инженер В.Д. Байнякшин (ЭНИС);*

*отв. исполнитель инженер В.И. Белов (ЭНИС);*

*исполнители: инженер В.К. Сафонов, канд. техн. наук В.Б. Карасев (предприятие п/я А-7291)*

Объектом исследования являются противозахватные устройства, устанавливаемые над кромкой перелива из тягового участка в кольцевой опускной канал контура циркуляции кипящего корпусного аппарата.

Цель работы — исследование захвата пара в опускной канал при различных конструкциях противозахватных устройств.

В процессе работы производились экспериментальные исследования зависимостей захвата пара от уровня в установке и скорости в опускном канале для давлений в рабочем участке 3,0, 5,0 и 7,0 МПа.

Результатами исследований показано, что применение противозахватного устройства из сетки саржевого плетения позволяет значительно снизить захват пара в оупск.

*Экспериментальные исследования устройств для уменьшения захвата пара в кольцевой опускной канал контура циркуляции: отчёт о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС; рук. В.Д. Байнякшин; исполн.: В.И. Белов, В.К. Сафонов, В.Б. Карасев. — Электрогорск, 1983. — 50 с. — Инв. № 11.248.*

### **Экспериментальное исследование модели тройника с компенсатором давления промежуточного контура реактора АСТ-500**

*Отв. исполнители: инженер Г.В. Осокин (ЭНИС), канд. техн. наук А.Г. Агеев, Б.А. Кольчугин (ЭНИН); исполнители: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко (ЭНИС), В.П. Грицына (ЭНИН)*

Представлены результаты экспериментального исследования модели тройника с компенсатором давления промежуточного контура реактора АСТ-500, выполненного в масштабе 1:2. Исследования проведены в диапазоне давлений 0,8–1,6 МПа и  $X_{\text{вх}} 0 \div 3 \%$ .

*Экспериментальное исследование модели тройника с компенсатором давления промежуточного контура реактора АСТ-500: отчёт о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Г.В. Осокин, А.Г. Агеев, Б.А. Кольчугин, Л.К. Тихоненко. — Электрогорск, 1983. — 59 с. — Инв. № 12.249.*

### **Исследование гидродинамики двухфазного потока в стержневой сборке применительно к реактору АСТ**

*Научные руководители работы: канд. техн. наук А.Г. Лобачев, А.П. Прошутинский (ЭНИС); отв. исполнители: инженеры Н.И. Трубкин, Т.В. Карпова (ЭНИС), канд. техн. наук Э.А. Захарова (ЭНИН); исполнитель инженер Ж.С. Струневская (ЭНИС)*

Представлены экспериментальные данные по истинным объёмным паросодержаниям, гидравлическим сопротивлениям и температурным режимам на семистержневой сборке, моделирующей кассету реактора АСТ-500 при  $P=1,0-5,0$  МПа,  $\rho_w=430 \div 1300$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $q=0,23 \div 0,4$  МВт/м<sup>2</sup>. Предложена методика расчёта истинного объёмного паросодержания в стержневых сборках исследованной геометрии при кипении с недогревом.

*Исследование гидродинамики двухфазного потока в стержневой сборке применительно к реактору АСТ: отчёт о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук.: А.Г. Лобачев, А.П. Прошутинский; исполн.: Н.И. Трубкин, Т.В. Карпова, Э.А. Захарова, Ж.С. Струневская. — Электрогорск, 1984. — 89 с. — Инв. № 21-23.275.*

### **Экспериментальное исследование закономерностей изменения давления в компенсаторе объёма 2-го контура реакторной установки АСТ-500**

*Руководители работы канд. техн. наук Л.К. Тихоненко (ЭНИС), чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин (ЭНИН); отв. исполнители: канд. техн. наук Г.В. Осокин (ЭНИС), А.Г. Агеев, Б.А. Кольчугин (ЭНИН); исполнители: канд. техн. наук В.П. Грицына, инженер О.Г. Бартоломей (ЭНИН)*

Экспериментально исследованы процессы в модели компенсатора объёма при сжатии пара применительно к условиям 2-го контура реакторной установки АСТ-500, в том числе и при наличии в паре неконденсирующегося газа (азота).

*Экспериментальное исследование закономерностей изменения давления в компенсаторе объёма 2-го контура реакторной установки АСТ-500: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук.: Л.К. Тихоненко, Г.Н. Кружилин; исполн.: Г.В. Осокин, А.Г. Агеев, Б.А. Кольчугин и др. — Электрогорск, 1985. — 67 с. — Инв. № 12.307.*

### **Исследование процессов газопереноса в парогазовом пространстве ПГКД реакторной установки АСТ-500**

*Руководитель работы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин (ЭНИН); отв. исполнители: канд. техн. наук Г.В. Осокин (ЭНИС), канд. техн. наук А.Г. Агеев, инженер О.Г. Бартоломей (ЭНИН)*

Экспериментально исследована модель парогазового компенсатора давления (ПГКД) реактора АСТ-500. Исследования проведены при штатных параметрах: давлении 1,96 МПа, скорости циркуляции в тяговом участке 0,43 м/с. Изучено распределение скоростей потока и концентраций гелия в различных зонах модели ПГКД реактора АСТ-500 при наличии и отсутствии колпака над теплообменником.

*Исследование процессов газопереноса в парогазовом пространстве ПГКД реакторной установки АСТ-500: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: Г.В. Осокин, А.Г. Агеев, О.Г. Бартоломей. — Электрогорск, 1986. — 122 с. — Инв. № 12.324.*

### **Испытания сепарационно-измерительного модуля с гладкой вставкой и вставкой с рёбрами**

*Отв. исполнители: инженеры Т.В. Карпова, Е.И. Кухтенкова; исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачев, инженер Н.Н. Трофимова (ЭНИС)*

Объектом исследования является сепарационно-измерительный модуль (СИМ) с двумя типами вставок (с рёбрами и гладкая).

Цель работы — выяснение возможности использования сепарационно-измерительного модуля со вставкой с рёбрами в системе предтурбинной сепарации пара на АЭС и выдача соответствующих рекомендаций.

Представлены результаты экспериментальных исследований, полученные на двух конструкциях сепарационно-измерительного модуля

ля в диапазоне режимных параметров влажного пара:  $P=3,0\div 7,0$  МПа,  $G=5700\div 9900$  кг/ч,  $w=5\div 23$  %.

Выявлено влияние основных режимных параметров влажного пара (давления, расхода, влажности) на коэффициент сепарации влаги для обеих конструкций СИМ.

*Испытания сепарационно-измерительного модуля с гладкой вставкой и вставкой с рёбрами: отчёт о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС; исполн.: Т.В. Карпова, Е.И. Кухтенкова, А.Г. Лобачев и др. — Электрогорск, 1987. — 53 с. — Инв. № 3.344.*

### **Экспериментальное исследование процессов истечения теплоносителя через внутриреакторные ограничители течи РУ АСТ-500**

*Руководитель работы, отв. исполнитель канд. техн. наук Л.К. Тихоненко (ЭНИС); исполнители: канд. техн. наук С.З. Лутовинов, инженер Н.С. Куракина (ЭНИС), канд. техн. наук Б.А. Кольчугин, Э.И. Ливерант (ЭНИН), инженер Г.И. Тарасов (предприятие п/я А-7755)*

Изучено истечение водного теплоносителя через внутриреакторную трубу со встроенным ограничителем течи РУ АСТ-500 в режимах, имитирующих аварию с разрывом трубопровода системы очистки вне реактора полным сечением. Опыты проведены в диапазоне давлений 0,3–3,0 МПа, начальных недогревов воды до 25 °С и величин их падения уровня ниже нижнего среза паровой трубы до 2850 мм, при максимальных расходах водного теплоносителя до 60 т/ч. Экспериментально определены границы области пароводяного истечения, установлена связь между расходами пара и воды, перепадами давления на верхней части модели и положением массового уровня.

*Экспериментальное исследование процессов истечения теплоносителя через внутриреакторные ограничители течи РУ АСТ-500: отчёт о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; рук. Л.К. Тихоненко; исполн.: С.З. Лутовинов, Н.С. Куракина, Б.А. Кольчугин и др. — Электрогорск, 1989. — 90 с. — Инв. № 1.360.*

### **Работы в обоснование проектных решений реакторов типа РБМК (1000, 1500, 2000), РБМК-КП-2400, МКЭР**

#### **Экспериментальное исследование максимальной проектной аварии на модели контура МПЦ РБМК**

*Отв. исполнители: инженер Л.В. Романова (ЭНИС), инженеры С.В. Ананьев, В.В. Горшков (ИАЭ); исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачев, А.П. Прошутинский (ЭНИС), инженер В.П. Волков (ИАЭ)*

Опыты проведены в диапазоне режимных параметров:  $P = 3,0\text{--}9,0$  МПа; недогрев теплоносителя на входе 10–60 °С;  $q=0,1\text{--}0,8$  МВт/м<sup>2</sup>; перерыв расхода теплоносителя 0–10 с. Экспериментальный участок состоял из 6 параллельных каналов. Опыты проведены при различных распределениях

сопротивлений имитаторов запорно-регулирующих клапанов (ЗРК) и тепловых нагрузок по каналам.

В работе представлены результаты экспериментального исследования максимальной проектной аварии (МПА) на модели контура МПЦ РБМК.

Исследовано влияние режимных и геометрических параметров на процессы обезвоживания, разогрева и обводнения при прекращении и повторной подаче теплоносителя в систему параллельных каналов. Экспериментально обнаружен существенный провал уровня воды в нижних водяных коммуникациях (НВК) и исследовано влияние режимных параметров на это явление, а также отмечен малый сток тепла в теплоноситель с момента возникновения кризиса теплоотдачи и до прихода фронта обводнения.

Установлено значительное влияние времени перерыва в подаче теплоносителя и величины повторного расхода на максимальную температуру нагревателя.

Полученные результаты сопоставлены с экспериментальными исследованиями МПА на модели одиночного технологического канала. Показано, что уменьшение расхода аварийной воды может приводить к возникновению неустойчивости движения и увеличению максимальной температуры стенки канала.

*Экспериментальное исследование максимальной проектной аварии на модели контура МПЦ РБМК: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ИАЭ им. И.В. Курчатова; исполн.: Л.В. Романова, С.В. Ананьев, В.В. Горшков и др. — Электрогорск, 1981. — 112 с. — Инв. № 23.216.*

### **Экспериментальное исследование критического истечения теплоносителя через модели вставок ограничения расхода при разрывах трубопроводов АЭС с реакторами типа РБМК**

*Исполнители: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко, инженер С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин (ЭНИС), канд. техн. наук Э.К. Карасев, инженер Б.А. Габараев (предприятие п/я А-7291)*

Экспериментально исследованы стационарные расходные характеристики моделей аварийных ограничителей расхода (сопло Лавалея с поперечным вдувом части теплоносителя через отверстия в боковой стенке, два длинных сопла Лавалея, короткий цилиндрический канал с острой входной кромкой и сужающееся сопло). Опыты выполнены при  $P_0 = 4$  и  $8$  МПа,  $\Delta t_{\text{нед.}} = 0-50$  °С,  $X_0 = 0-1$ . Полученные опытные данные представляют практическую ценность как для проектирования систем локализации аварий с потерей теплоносителя на реакторных установках РБМК, так и с точки зрения экспериментального обоснования руководящего технического материала (РТМ) по расчету критических расходов.

*Экспериментальное исследование критического истечения теплоносителя через модели вставок ограничения расхода при разрывах трубопроводов АЭС с реакторами типа РБМК: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: Л.К. Тихоненко, С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин и др. — Электрогорск, 1981. — 39 с. — Инв. № 12.224.*

### **Испытания макетов перегревательного канала**

*Отв. исполнители: инженер В.Д. Байнякшин (ЭНИС), инженеры Т.С. Максимова, Л.Т. Руденская, Э.В. Можарова (предприятие п/я А-7291); исполнители: инженеры А.А. Хохонова, техник Т.В. Корючева (ЭНИС); инженеры И.Г. Шутько, С.В. Шилло, Е.В. Чермашенцев, Р.С. Храпова, М.П. Сигачева, В.М. Монаков, А.М. Смоленцева; техник А.С. Комаров, лаборант Н.В. Евсеева (предприятие п/я А-7291)*

Проведены испытания (~ 5000 часов) четырёхзвенного канала, изготовленного из четырёх макетов трубы перегревательного канала реактора РБМ-КП. В канал при испытаниях подавался пар с температурой 350 °С и давлением 7,85 МПа, снаружи канала продувалась парозотная смесь. Установлено, что на разных трубах скорость ползучести составляет от  $1,5 \cdot 10^{-5}$  до  $4,0 \cdot 10^{-5}$ , что выше требуемых по условиям работы каналов реактора РБМ-КП. За время испытаний не было нарушения герметичности переходников и сварных соединений. Коррозионная стойкость элементов макетов оценена как достаточная для макета с наименьшей скоростью ползучести.

*Испытания макетов перегревательного канала: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: В.Д. Байнякшин, Т.С. Максимова, Л.Т. Руденская, Э.В. Можарова и др. — Электрогорск, 1981. — 83 с. — Инв. № 11.214.*

### **Исследование коррозионного поведения циркониевого сплава ЦЖХВ и сплавов Zr-ЧССР-1 и Zr-ЧССР-2 в перегретом водяном паре в динамических условиях**

*Руководитель работы чл.-кор. АН СССР А.С. Займовский (предприятие п/я Р-6575); отв. исполнители: инженер Г.С. Полякова (ЭНИС), инженер Н.М. Александрова (ЭНИН), И.В. Удалова (предприятие п/я Р-6575)*

Изучено коррозионное поведение сплавов циркония Zr-ЧССР-1 и Zr-ЧССР-2 и ЦЖХВ, в потоках водяного перегретого пара, содержащего 20—40 мг/кг кислорода, при температурах 400, 450, 500 и 560 °С и давлении 8,5 МПа. Длительность испытаний составила 5794 час. Показано, что повышение температуры от 400 до 560 °С увеличивает интенсивность окисления испытанных сплавов.

*Исследование коррозионного поведения циркониевого сплава ЦЖХВ и сплавов Zr-ЧССР-1 и Zr-ЧССР-2 в перегретом водяном паре в динамических условиях: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я Р-6575; рук. А.С. Займовский; исполн.: Г.С. Полякова, Н.М. Александрова, И.В. Удалова. — Электрогорск, 1981. — 38 с. — Инв. № 31.56.*

### **Исследование аварийного охлаждения кольцевого канала**

*Отв. исполнители: инженер Е.И. Кухтенкова (ЭНИС), канд. техн. наук Е.М. Ставиский (ЭНИН), инженер Г.И. Савватимский (ИАЭ); исполнитель инженер И.В. Елкин (ЭНИН)*

Работа посвящена экспериментальному исследованию теплогидравлической обстановки в испарительном канале при перерыве в подаче тепло-

носителя с последующим восстановлением его расхода. Опыты выполнены на кольцевом канале с электрообогреваемой внутренней трубкой  $d\ 16 \times 1$  мм и необогреваемой обечайкой внутренним  $d=22$  мм, в диапазоне режимных параметров:  $P=3-12$  МПа,  $\rho_w=700-2100$  кг/м<sup>3</sup>·с,  $q=250-1050$  кВт/м<sup>2</sup>, недогрев воды на входе ( $\Delta t$ )= $20-70$  °С, температура начала расхолаживания ( $t_{\text{н}}$ )= $800-1100$  °С. Представлены полученные данные о динамике процессов разогрева и расхолаживания кольцевого канала.

*Исследование аварийного охлаждения кольцевого канала: отчёт о НИР / НПО «Энергия», ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ИАЭ им. И.В. Курчатова; исполн.: Е.И. Кухтенкова, Е.М. Ставиский, Г.И. Савватимский, И.В. Елкин. — Электрогорск, 1981. — 57 с. — Инв. № 23.223.*

### **Испытания и исследования укороченных макетов каналов с термоупрочнёнными укороченными трубами из сплава марки Э-125 применительно к условиям эксплуатации реакторов типа РБМК**

*Отв. исполнители: инженеры И.Н. Горячкин (ЭНИС), И.И. Акимов (предприятие п/я А-7291);*

*исполнители: инженер В.А. Гашенко (ЭНИС), д-р техн. наук О.А. Шатская, канд. техн. наук Г.Н. Шевелёв, Б.С. Родченков, Б.Г. Парфёнов, М.И. Плышевский, инженеры Н.А. Шеенкова, В.Н. Монаков, П.П. Федорович, С.Н. Новожилов, Л.Т. Руденская, Н.С. Рассошкина, М.П. Сигачёва, А.М. Смоленцев*

Проведены длительные (~ 5000 ч) стендовые коррозионные испытания макетов технологических каналов ядерных энергетических реакторов, состоящих из труб диаметром  $63 \times 4$  мм циркониевого сплава марки Э-125 и переходных сварных соединений «сплав марки Э-125— сталь», в потоке пароводяной смеси при температуре 285 и 355 °С, давлении 7,9 и 17,9 МПа, паросодержании до 30% и концентрации кислорода в смеси от 4 до 30 мг/кг, при скорости потока 3–5 м/с. С внешней стороны макеты омывались потоком газовой смеси сложного состава на основе азота, гелия, содержащей 0,11 объёмных % кислорода, 2,5 мг/кг влаги и продукты окисления графита. На основании результатов исследований сделаны выводы о наиболее перспективных вариантах технологии изготовления труб и сварных соединений.

*Испытания и исследования укороченных макетов каналов с термоупрочнёнными укороченными трубами из сплава марки Э-125 применительно к условиям эксплуатации реакторов типа РБМК: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: И.Н. Горячкин, И.И. Акимов, В.А. Гашенко и др. — Электрогорск, 1982. — 96 с. — Инв. № 31.59.*

### **Коррозионная стойкость циркония и его сплавов в пароводяной смеси при температуре 350 °С с повышенным содержанием кислорода**

*Руководитель работы чл.-кор. АН СССР А.С. Займовский (предприятие п/я Р-6575); отв. исполнители: инженеры И.Н. Горячкин (ЭНИС), И.В. Удалова (предприятие п/я Р-6575), Н.М. Александрова (ЭНИН)*

Проведены коррозионные испытания сплавов в кислородсодержащей ( $C_{O_2} = 25-30$  мг/кг) и деаэрированной пароводяной смеси при температуре 350 °С, давлении 16,7 МПа, скорости 3–5 м/с. Испытаны четыре циркониевых сплава (110, 125, 625 и ЦЖХВ), а также бинарные циркониевые сплавы, легированные железом, хромом и оловом.

*Коррозионная стойкость циркония и его сплавов в пароводяной смеси при температуре 350 °С с повышенным содержанием кислорода: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я Р-6575; рук. А.С. Займовский; исполн.: И.Н. Горячкин, И.В. Удалова, Н.М. Александрова. — Электрогорск, 1982. — 36 с. — Инв. № 31.58.*

### **Исследование влияния подготовки поверхности на коррозионную стойкость сварных соединений циркониевых сплавов**

*Отв. исполнители: инженеры М.И. Савельева (ЭНИС), В.Н. Монаков (предприятие п/я А-7291), Н.М. Александрова (ЭНИН); исполнители: инженеры В.А. Гашенко (ЭНИС), В.Н. Тюрин, канд. техн. наук М.Н. Плышевский, инженер В.П. Сидорова (предприятие п/я А-7291)*

Работа посвящена исследованию влияния различных видов подготовки поверхности после электроннолучевой сварки на коррозионную стойкость сварных соединений циркониевых сплавов марок Э-125, Э-110 и чистого йодидного циркония в воде при температуре 300 °С в статических условиях. Представлены полученные результаты. Показано, что механическая обработка тонколистовых сварных образцов исследуемых сплавов не оказывает существенного влияния на их коррозионную стойкость в рассматриваемых условиях. Травление снижает коррозионную стойкость швов и зоны термического влияния сварных соединений из сплава марки Э-125, оказывает меньшее влияние на стойкость этих зон соединений сплавов марок Э-110 и 100 и повышает коррозионную стойкость основного металла всех исследованных сплавов.

*Исследование влияния подготовки поверхности на коррозионную стойкость сварных соединений циркониевых сплавов: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я А-7291; исполн.: М.И. Савельева, В.Н. Монаков, Н.М. Александрова и др. — Электрогорск, 1982. — 46 с. — Инв. № 31.247.*

## **Исследование коррозионной стойкости сплавов циркония и их сварных соединений в газовой среде сложного состава**

*Отв. исполнители: инженер О.Н. Абакумова (ЭНИС), инженер Г.В. Дмитриев (предприятие п/я А-7291); исполнители: инженер В.А. Гашенко (ЭНИС), канд. техн. наук М.И. Плышевский, инженер В.Н. Тюрин (предприятие п/я А-7291)*

Исследовалась коррозионная стойкость, в том числе наводороживающие, циркониевых сплавов марок Э-125, ЦЖХВ и их сварных соединений, выполненных электронно-лучевой, аргоно-дуговой сваркой и сваркой трением с последующей обработкой по различным вариантам, в специальном стенде, в условиях, имитирующих условия работы графитовой кладки уран-графитовых реакторов типа РБМК при температуре 350, 400, 450 и 500 °С в течение 6000 часов без облучения.

*Исследование коррозионной стойкости сплавов циркония и их сварных соединений в газовой среде сложного состава: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: О.Н. Абакумова, Г.В. Дмитриев, В.А. Гашенко и др. — Электрогорск, 1982. — 57 с. — Инв. № 31.231.*

## **Разработка конструкции экспериментальной установки и методики проведения исследований фреттинг-коррозии**

*Отв. исполнитель инженер И.Н. Горячкин (ЭНИС); исполнители: инженеры В.А. Гашенко, Н.Т. Ефимов (ЭНИС); канд. техн. наук С.Г. Пастушенко (НПО «Энергия»), канд. техн. наук К.Н. Никитин, инженер С.А. Кочергин (МХТИ им. Д.И. Менделеева)*

Спроектирована и смонтирована установка для исследования закономерностей виброкоррозионного износа оболочек твэлов реактора типа РБМК в статических условиях в водной (паровой) среде. Опробована методика измерений параметров виброкоррозионного износа (фреттинг-коррозия) в статических условиях.

*Разработка конструкции экспериментальной установки и методики проведения исследований фреттинг-коррозии: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; исполн.: И.Н. Горячкин, В.А. Гашенко, Н.Т. Ефимов и др. — Электрогорск, 1982. — 17 с. — Инв. № 31.246.*

## **Исследование коррозионной стойкости сварных соединений труб из сплава марки Э-125 в потоке пароводяной смеси**

*Отв. исполнители: инженер Г.С. Полякова (ЭНИС), инженер В.Н. Монаков (предприятие п/я А-7291); инженер Н.М. Александрова (ЭНИН); исполнители: инженеры Г.В. Дмитриев, С.И. Кузькин, Ю.К. Логинов, В.П. Сидоров, И.В. Кольцов (предприятие п/я А-7291)*

Проведены испытания в потоке пароводяной смеси применительно к условиям эксплуатации технологических каналов реакторов типа РБМК-1500

( $P=6,86$  МПа,  $T=280$  °С) образцов сварных соединений термоупрочненных труб, выполненных по перспективным технологиям электронно-лучевой сварки и сварки трением.

*Исследование коррозионной стойкости сварных соединений труб из сплава марки Э-125 в потоке пароводяной смеси: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: Г.С. Полякова, В.Н. Монаков, Н.М. Александрова и др. — Электрогорск, 1982. — 27 с. — Инв. № 77/83.*

### **Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик модели паро-перегревательной ТВС реактора типа РБМ-КП**

*Отв. исполнители: инженеры А.Ф. Чалых, Г.И. Манойленко, Е.В. Столяров, З.А. Максимова (ЭНИС); канд. техн. наук В.П. Смирнов, инженер Б.Н. Баскаков (предприятие п/я А-7291)*

Экспериментально исследованы теплогидравлические характеристики двух обогреваемых и одной необогреваемой моделей 19-стержневой тепловыделяющей сборки реактора типа РБМ-КП (гладкие трубки диаметром  $10 \times 0,4$  мм, обогреваемая длина 1600 мм) при давлении пара на входе 7,85 МПа, температуре пара на входе 350–450 °С, удельной плотности теплового потока 0,3–0,7 МВт/м<sup>2</sup>. Получены данные по коэффициентам гидравлического сопротивления модели сборки и дистанционирующей решётки неравномерного затеснения.

*Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик модели паро-перегревательной ТВС реактора типа РБМ-КП: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: А.Ф. Чалых, Г.И. Манойленко, Е.В. Столяров и др. — Электрогорск, 1982. — 104 с. — Инв. № 2.235.*

### **Экспериментальное исследование теплогидравлической устойчивости в контуре МПЦ**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.Г. Лобачев (ЭНИС); отв. исполнитель канд. техн. наук А.П. Прошутинский (ЭНИС); исполнитель инженер Л.В. Романова (ЭНИС); соисполнители: инженеры В.П. Волков, В.В. Горшков (ИАЭ)*

Экспериментально исследованы теплогидравлическая устойчивость контура МПЦ, автоколебания параметров и условия устойчивой работы аппарата РБМК-1500 на модели контура МПЦ с использованием шести и двухканальных сборок. Определены границы теплогидравлической устойчивости в широком диапазоне недогрева теплоносителя на входе в канал.

*Экспериментальное исследование теплогидравлической устойчивости в контуре МПЦ: отчет о НИР / ЭНИС НПО «Энергия», ИАЭ им. И.В. Курчатова; рук. А.Г. Лобачев; исполн.: А.П. Прошутинский, Л.В. Романова, В.П. Волков, В.В. Горшков. — Электрогорск, 1982. — 81 с. — Инв. № 23.236.*

### **Экспериментальное исследование влияния геометрических и конструктивных факторов на кризис теплоотдачи и гидравлическое сопротивление в сборках с интенсификаторами теплообмена**

*Исполнители: инженеры А.Ф. Чалых, Е.В. Столяров (ЭНИС), инженер Т. Югай (ЭНИН), канд. техн. наук А.И. Емельянов, инженер А.Н. Шилов (предприятие п/я А-7291)*

Экспериментально отработаны интенсификаторы теплообмена применительно к РБМК-1500 – интенсификаторы осевой закрутки и интенсификаторы с цилиндрическими ячейками разных типов.

*Экспериментальное исследование влияния геометрических и конструктивных факторов на кризис теплоотдачи и гидравлическое сопротивление в сборках с интенсификаторами теплообмена: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я А-7291; исполн.: А.Ф. Чалых, Е.В. Столяров, Т. Югай и др. — Электрогорск, 1982. — 89 с. — Инв. № 22.242.*

### **Экспериментальное обоснование применения струйного конденсатора в качестве рабочего элемента для системы локализации аварии на АЭС с потерей теплоносителя**

*Исполнители: канд. техн. наук А.П. Прошутинский, инженер А.Г. Толмачев (ЭНИС), инженеры В.Д. Булынин, В.П. Косенко, канд. техн. наук В.Н. Майданик (ВНИИАЭС)*

На специально созданной экспериментальной установке проведены исследования модификаций струйного и вихревого конденсаторов, результаты которых позволили выбрать модель конденсационного элемента, характеризующегося надежной работой и технологичностью изготовления.

*Экспериментальное обоснование применения струйного конденсатора в качестве рабочего элемента для системы локализации аварии на АЭС с потерей теплоносителя: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; исполн.: А.П. Прошутинский, А.Г. Толмачев, В.Д. Булынин и др. — Электрогорск, 1982. — 49 с. — Инв. № 23.245.*

### **Испытания макетов перегревателя канала № 3**

*Руководитель работы В.Д. Байнякшин (ЭНИС); соисполнители: инженеры Т.С. Максимова, Л.Т. Руденская, В.М. Монаков, С.В. Шилло, А.Н. Семенов, А.И. Смоленцев*

В рамках работы проведены длительные (в течение 3000 ч) стендовые испытания в потоке перегретого пара (давление  $7,85 \pm 0,2$  МПа, температура  $350 \pm 10$  °С) перегревателя канала, циркониевая часть которого выполнена из четырех укороченных макетов труб из сплава Э-125 с различной термомеханической обработкой и из сплава Э-635. Представлены полученные результаты.

*Испытания макетов перегревателя канала № 3: отчет о НИР / ЭНИС НПО «Энергия», предприятие п/я А-7291; рук. В.Д. Байнякшин; исполн.: Т.С. Максимова, Л.Т. Руденская, В.М. Монаков и др. — 70 с. — Электрогорск, 1982. — Инв. № 11.237.*

## **Разработка и экспериментальное обоснование методики исследований коррозионного растрескивания под напряжением циркониевых сплавов в присутствии йода**

*Руководитель темы канд. техн. наук В.Б. Кириллов; отв. исполнители: инженер И.Н. Горячкин (ЭНИС), инженер В.К. Чистякова (ВНИИАЭС); исполнители: инженер В.А. Гашенко (ЭНИС), инженер О.В. Лавренчук (ВНИИАЭС)*

Отработана методика проведения испытаний на коррозионное растрескивание циркониевых трубчатых образцов-имитаторов твэлов под действием внутреннего давления инертного газа в присутствии йода на специально созданном экспериментальном стенде.

В результате проведенных экспериментов установлен пороговый уровень разрушающих напряжений для образцов-имитаторов при испытаниях внутренним давлением газа в отсутствие йода. Показано, что при введении йода в образцы в количестве 320 мг, испытания внутренним давлением свыше 28,0 МПа приводят к коррозионному растрескиванию металла в зоне сварного соединения.

*Разработка и экспериментальное обоснование методики исследований коррозионного растрескивания под напряжением циркониевых сплавов в присутствии йода: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. В.Б. Кириллов; исполн.: И.Н. Горячкин, В.К. Чистякова, В.А. Гашенко и др. — Электрогорск, 1983. — 21 с. — Инв. № 31.264.*

## **Испытание струйных систем для использования в качестве быстродействующих измерительных устройств**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.П. Прошутинский; отв. исполнители: инженеры Г.Г. Басова, Е.И. Кухтенкова (ЭНИС); соисполнители: инженеры С.Г. Виногоров, В.П. Симонов, А.С. Курочкин (ИАЭ)*

Представлены результаты проведенных на экспериментальном стенде испытаний четырёх струйных устройств, являющихся элементами перспективных автоматических систем управления аварийного охлаждения реактора (САОР): расходомера, уровнемера, быстродействующего клапана и переключателя расхода, позволяющих в значительной мере повысить надёжность и точность этих систем за счёт использования принципиально новых эффектов. Определены границы параметров, при которых происходит срабатывание быстродействующего клапана.

*Испытание струйных систем для использования в качестве быстродействующих и измерительных устройств: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ИАЭ им. И.В. Курчатова; рук. А.П. Прошутинский; исполн.: Г.Г. Басова, Е.И. Кухтенкова, С.Г. Виногоров и др. — Электрогорск, 1983. — 43 с. — Инв. № 21-23.257.*

### **Экспериментальное исследование деформационного поведения оболочек твэлов РБМК из сплава Zr 1% Nb при высоких температурах**

*Исполнители: инженеры М.П. Гашенко, Н.И. Алаев (ЭНИС); инженер В.М. Лазаренко, канд. техн. наук О.Ю. Новосельский, инженер Л.Я. Лонинов (предприятие н/я А-7291); инженеры В.И. Соляный, А.В. Салатов, Ю.В. Пименов, В.В. Драпенко (предприятие н/я Р-6575)*

Выполнено экспериментальное исследование процессов разрушения при нагружении внутренним давлением и смятия при нагружении наружным давлением моделей оболочек твэлов реактора РБМК в диапазонах температур 500–1000 °С и перепадов давления 1–0,8 МПа в инертной среде. Получены данные по предельному состоянию (разрыв, смятие) оболочек и корреляции параметров для этих состояний.

*Экспериментальное исследование деформационного поведения оболочек твэлов РБМК из сплава Zr 1 % Nb при высоких температурах: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие н/я А-7291, предприятие н/я Р-6575; исполн.: М.П. Гашенко, Н.И. Алаев; В.М. Лазаренко и др. — Электрогорск, 1983. — 75 с. — Инв. № 22.253.*

### **Экспериментальное исследование теплогидравлической эффективности интенсификаторов теплообмена для реакторов РБМК**

*Отв. исполнитель инженер Е.В. Столяров (ЭНИС); исполнители: инженер А.Ф. Чалых (ЭНИС); канд. техн. наук А.И. Емельянов, инженер С.Ю. Саввин (предприятие н/я А-7291); инженер Т. Югай (ЭНИС)*

Исследовано влияние на кризис теплоотдачи различных вариантов интенсификаторов теплообмена осевой закрутки, интенсификаторов с цилиндрическими ячейками в сборках, а также штатной решётки — интенсификатора теплообмена ТВС реактора РБМК-1500. Получены значения  $q_{кр.}$  в широком диапазоне режимных параметров.

*Экспериментальное исследование теплогидравлической эффективности интенсификаторов теплообмена для реакторов РБМК: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, предприятие н/я А-7291; исполн.: Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, А.И. Емельянов. — Электрогорск, 1984. — 78 с. — Инв. № 22.61.*

### **Расчёт критических расходов водного теплоносителя через прямые трубы**

*Отв. исполнитель канд. техн. наук Л.К. Тихоненко; исполнители: инженеры С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин (ЭНИС), канд. техн. наук О.Ю. Новосельский, Э.К. Карасев; инженер Б.А. Габараев (предприятие н/я А-7291)*

Выполнены анализ и обобщение опытных данных в виде методики по критическому истечению недогретой и насыщенной воды, пароводяной смеси и слабоперегретого пара через диафрагмы и трубы с различным

оформлением входной кромки (острой, конической и радиальной), которая справедлива при начальных давлениях 0,3–10 МПа. Эта методика предложена, как первая редакция одного из разделов РТМ.

*Расчёт критических расходов водного теплоносителя через прямые трубы: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: Л.К. Тихоненко, С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин и др. — Электрогорск, 1984. — 83 с. — Инв. № 12.270.*

### **Экспериментальное исследование теплогидравлической устойчивости в контуре МПЦ с идентичными каналами**

*Исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачев, А.П. Прошутинский, инженеры Л.В. Романова, Е.В. Меркулов (ЭНИС);*

*соисполнители: инженеры В.П. Волков, В.В. Горшков (ИАЭ)*

Проведено исследование теплогидравлической устойчивости контура МПЦ, периода колебаний на границе устойчивости, периода и амплитуды пульсаций в неустойчивой области в условиях, моделирующих контур МПЦ РБМК-1000 и РБМК-1500, на пяти- и шестиканальных сборках идентичных в теплогидравлическом отношении каналов. Полученные экспериментальные данные позволили дать оценку ситуации в контуре МПЦ в условиях нормальной эксплуатации и при авариях, а их сопоставление с данными других исследований, а также расчётный анализ дают основание полагать, что границы устойчивости в канале РБМК близки к границам устойчивости, полученным на модели.

*Экспериментальное исследование теплогидравлической устойчивости в контуре МПЦ с идентичными каналами: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ИАЭ им. И.В. Курчатова; исполн.: А.Г. Лобачев, А.П. Прошутинский, Л.В. Романова и др. — Электрогорск, 1984. — 101 с. — Инв. № 21-23.274.*

### **Испытания перегревателя канала реактора РБМ-КП с цельной циркониевой трубой**

*Отв. исполнитель инженер Н.П. Майданик (ЭНИС);*

*исполнители: техник Т.В. Корючева (ЭНИС), инженеры Т.С. Максимова, Л.Т. Руденская, В.Г. Денисов, А.М. Смоленцев, А.Ф. Лунин, С.А. Кочергин, техник В.А. Евтеев (предприятие п/я А-7291)*

Представлены результаты испытаний в течение первых 2000 часов полномасштабного технологического канала реактора РБМ-КП с трубой из сплава Э-125 после термомеханической обработки ТМО-2 в потоке деаэрированного (кислород ~ 0,02 мг/кг) перегретого пара при температуре 360 °С, давлении 8 МПа. Снаружи каналы продувались парозотной смесью.

*Испытания перегревателя канала реактора РБМ-КП с цельной циркониевой трубой: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: Н.П. Майданик, Т.В. Корючева, Т.С. Максимова и др. — Электрогорск, 1984. — 46 с. — Инв. № 11.278.*

### **Экспериментальное исследование теплогидравлической устойчивости в контуре МПЦ с неравномерным энерговыделением по длине нагревателя**

*Исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачев, А.П. Прошутинский, инженеры Л.В. Романова, Е.В. Меркулов, А.Ю. Сколкин (ЭНИС); соисполнители: инженеры В.П. Волков, В.В. Горшков (ИАЭ)*

Экспериментально исследованы границы теплогидравлической устойчивости в условиях, близких к номинальным режимам эксплуатации и ожидаемым при аварийных ситуациях на модели контура МПЦ с использованием нагревателей с имитацией натурального энерговыделения с интенсификаторами теплообмена по длине. Показано, что в условиях АЭС с РБМК-1500 при номинальном режиме запасы до границы устойчивости малы и предложены мероприятия, позволяющие повысить запасы до границ теплогидравлической устойчивости; дана оценка ситуации в контуре МПЦ в условиях аварий с потерей теплоносителя.

*Экспериментальное исследование теплогидравлической устойчивости в контуре МПЦ с неравномерным энерговыделением по длине нагревателя: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ИАЭ им. И.В. Курчатова; исполн.: А.Г. Лобачев, А.П. Прошутинский, Л.В. Романова и др. — Электрогорск, 1985. — 89 с. — Инв. № 21-23.318.*

### **Экспериментальное обоснование струйного конденсатора для системы локализации аварий с потерей теплоносителя применительно ко 2-й очереди Игналинской АЭС**

*Исполнители: инженер А.Г. Томачёв (ЭНИС), канд. техн. наук В.Н. Майданик, инженер В.Д. Булыгин (ВНИИАЭС)*

Проведены эксперименты с целью обоснования применения струйного конденсатора в системе локализации максимальной проектной аварии при разрыве трубопровода применительно к 2-й очереди Игналинской АЭС в диапазоне расходов пара 0,5–12 кг/с. Показана надёжная работа струйного конденсатора при процентном содержании воздуха в паро-воздушной смеси от 0 до 100 %. Во всём исследованном диапазоне были получены величины коэффициентов инжекции, гарантирующие практически полную конденсацию пара в камере смешения инжектора, благодаря чему удалось локализовать пульсации давления в объёме камеры смешения и исключить их влияние на конструкционную прочность системы в целом. Экспериментально показана возможность использования всего объёма охлаждающей жидкости в бассейне при неподаче ГПК. Показано отсутствие влияния масштабного фактора на работу струйного конденсатора в широком диапазоне геометрических размеров, что позволяет использовать разработанную методику расчёта для проектирования струйных конденсаторов любых заданных типоразмеров.

*Экспериментальное обоснование струйного конденсатора для системы локализации аварий с потерей теплоносителя применительно к 2-й очереди Игналинской*

*АЭС: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; исполн.: А.Г. Томачёв, В.Н. Майданик, В.Д. Булыгин. — Электрогорск, 1985. — 46 с. — Инв. № 23.317.*

### **Экспериментальное исследование критического истечения теплоносителя через модели вставок ограничения расхода при разрывах трубопроводов с реакторами типа РБМК**

*Исполнители: инженер С.З. Лутовинов, канд. техн. наук Л.К. Тихоненко, инженер Е.И. Трубкин (ЭНИС), инженер Б.А. Габараев, канд. техн. наук Э.К. Карасев, О.Ю. Новосельский (предприятие п/я А-7291)*

Объектом исследования являлись модели сопловых ограничителей аварийного расхода теплоносителя (СОАР), предназначенных для циркуляционных контуров реакторов типа РБМК.

Экспериментально изучались стационарные расходные характеристики сопел как в гидравлическом, так и в критическом режимах истечения.

Приведены результаты двух исследованных сопел с боковым вдувом части потока через тангенциальные окна, двух сопел с выступающими в проточную часть боковыми каналами и трех сопел с коническими сужающимися участками без поперечного вдува. Опыты проведены на воде с начальным недогревом  $0 \div 50$  °С, пароводяной смеси с начальным паросодержанием  $0 \div 1$  и паре с перегревом  $0 \div 30$  °С при давлениях  $0,98 \div 8,83$  МПа.

Показана принципиальная возможность дальнейшего повышения эффективности СОАР за счет вдува части потока через тангенциальные окна в узком сечении сопла.

*Экспериментальное исследование критического истечения теплоносителя через модели вставок ограничения расхода при разрывах трубопроводов с реакторами типа РБМК: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: С.З. Лутовинов, Л.К. Тихоненко, Е.И. Трубкин и др. — Электрогорск, 1985. — 46 с. — Инв. № 12.308.*

### **Стендовые экспериментальные исследования температурных режимов внутримодульных трубок диаметром 14x1,2 мм и условий возникновения интенсивных пульсаций температур стенки нагрева**

*Научный руководитель работы канд. техн. наук А.Г. Лобачев; отв. исполнители: инженеры Е.И. Трубкин, Г.Г. Басова, Г.И. Маноленко (ЭНИС), инженер К.А. Малышев, канд. техн. наук В.А. Виноградов (ВНИИАЭС)*

На однотрубной электрообогреваемой модели экспериментально исследованы температурные режимы, причины и условия возникновения интенсивных пульсаций температур поверхности теплоотдачи, амплитудно-частотные характеристики пульсаций температуры на входном участке пароперегревательного канала модуля СПП-500-1 в диапазоне режимных параметров, характерных для работы модуля. Впервые полученные для исследованного диапазона режимных параметров характеристики пульсаций температур стенки послужили исходным материалом для расчетов

долговечности конструкции и разработки технических предложений по повышению надежности внутримодульных трубок СПП-500-1.

*Стендовые экспериментальные исследования температурных режимов внутримодульных трубок диаметром 14х1,2 мм и условий возникновения интенсивных пульсаций температур стенки нагрева: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. А.Г. Лобачев; исполн.: Е.И. Трубкин, Г.Г. Басова, Г.И. Маноленко и др. — Электрогорск, 1985. — 51 с. — Инв. № 21-22.310.*

### **Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления моделей перегревателя канала реактора РБМ-КП при изотермическом течении пара**

*Исполнители: инженеры А.Ф. Чалых, З.А. Максимова (ЭНИС), канд. техн. наук Ю.Н. Никитин, В.Р. Младов, В.П. Смирнов, инженер О.А. Ярмоленко (предприятие п/я А-7291)*

Представлены результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления 4 моделей перегревателя канала РБМ-КП с установленной в них 19-стержневой сборкой из трубок диаметром 10×0,4 мм с различным концевым расстоянием при изотермическом течении пара с параметрами: давление 7,85 МПа, температура 350 °С, расход 1,34–3,33 кг/с.

*Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления моделей перегревателя канала реактора РБМ-КП при изотермическом течении пара: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: А.Ф. Чалых, З.А. Максимова, Ю.Н. Никитин и др. — Электрогорск, 1985. — 17 с. — Инв. № 106/85.*

### **Результаты испытаний модели технологического канала с кассетой реактора РБМК-1500 на ст. 17П ЭНИС**

*Руководитель работы инженер В.Д. Байнякшин; отв. исполнитель инженер И.Н. Маслова*

В рамках темы «Исследование гидродинамики технологических каналов РБМК-1000, 1500 для определения закономерностей возникновения вибрации и виброкоррозионного износа оболочек элементов» проведены экспериментальные исследования с целью определения локальных гидродинамических характеристик пароводяного потока в модели технологического канала с кассетой и при параметрах реактора РБМК-1500 при следующих параметрах пароводяной смеси на входе в модель технологического канала: давление — 3,0 МПа, паросодержание  $X = 0,3$ , массовая скорость 2500 кг/м<sup>2</sup>·с). Полномасштабная модель технологического канала с верхней тепловыделяющей сборкой кассеты реактора РБМК-1500 была установлена в контур циркуляционного стенда. Тринадцать стержней сборки оснащены специальными сверленными вставками (34 шт.), расположенными в определенных сечениях по высоте кассеты. Импульсные линии отборов пробы выведены на измерительные системы (сепараторные и калориметрические) через отверстия в коллекторе кассеты. Отбор пробы со стенки канала осуществлялся через 4 пробоотборника и поступал на отдельную измеритель-

ную систему (сепараторную и калориметрическую). Экспериментально определены следующие гидродинамические характеристики потока: расходы жидкости и пара в пробах среды, отбираемых со стержней и стенки ТК, в различных сечениях по высоте канала; разности давлений среды по высоте канала; давление, расход и расходное массовое паросодержание пароводяной смеси на выходе из канала.

*Результаты испытаний модели технологического канала с кассетой реактора РБМК-1500 на ст. 17П ЭНИС»: акт № 1 ЭНИС ВНИИАЭС / рук. В.Д. Байнякшин; исполн. И.Н. Маслова. — Электрогорск, 1985. — 30 с. — Инв. № 113/85 с.*

### **Внедрение нейтрально-кислородного водного режима (НКВР) на Курской АЭС**

*Научный руководитель работы чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин; исполнители: канд. техн. наук И.С. Дубровский, А.А. Любимов (ЭНИН); Б.С. Чекалин, В.В. Волков, В.Н. Кожин, Т.Н. Калинина (Курская АЭС), Н.И. Алаев (ЭНИС)*

Выполнена экспериментальная проверка эффекта от дозирования газообразного кислорода в конденсатный тракт первого энергоблока Курской АЭС. Подтвержден эффект смыва радиоактивных продуктов коррозии с поверхностей оборудования в начальный период дозирования кислорода. Зафиксировано снижение поступления продуктов коррозии с питательной водой в КМПЦ при дозировании кислорода. Приведены результаты детального обследования радиационных и химических параметров КПТ и КМПЦ первого энергоблока. Степень внедрения — реализация НКВР на первом энергоблоке и разработка технического проекта для перевода на НКВР всех четырех энергоблоков КАЭС с дозированием кислорода от азотно-кислородной станции, вместо дискретного дозирования от кислородной рампы.

*Внедрение нейтрально-кислородного водного режима (НКВР) на Курской АЭС: отчет о НИР / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, Курской АЭС, ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Г.Н. Кружилин; исполн.: И.С. Дубровский, А.А. Любимов, Б.С. Чекалин и др. — М., — Курчатов, 1985. — 53 с. — Инв. № 84 (ЭНИЦ).*

### **Исследование поведения конструкционных и уплотняющих материалов в условиях воздействия на них дезактивирующих растворов**

*Отв. исполнители: инженеры О.Н. Абакумова (ЭНИС), В.Н. Иванов (Курская АЭС); исполнители: инженер В.А. Гашенко, техник Н.В. Нестерова (ЭНИС)*

Исследовано поведение конструкционных (сталь 08X18H10T и циркониевый сплав Э-110) и уплотнительных (медь, паронит, баббит) материалов, в условиях, имитирующих эксплуатационный режим КМПЦ реактора РБМК с последующим воздействием на них дезактивирующих растворов по штатным регламентам дезактивации. Определена стойкость

защитных покрытий на образцах стали 08X18H10T и меди марки М<sub>1</sub>, а также на шарах первичного преобразователя ШАДР-ШТОРМ-32М в условиях дезактивации КМПЦ.

*Исследование поведения конструкционных и уплотняющих материалов в условиях воздействия на них дезактивирующих растворов: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, Курской АЭС; исполн.: О.Н. Абакумова, В.Н. Иванов, В.А. Гашенко, Н.В. Нестерова. — Электрогорск, 1985. — 62 с. — Инв. № 31.306.*

### **Исследование стойкости к окислению в азотно-гелиевой среде сварных соединений труб СУЗ РБМК из сплава Э-125**

*Отв. исполнители: инженеры О.Н. Абакумова (ЭНИС), Г.В. Дмитриев (предприятие п/я А-7291);*

*исполнители: канд. техн. наук М.И. Плышевский, инженер А.Т. Руденская (предприятие п/я А-7291)*

Представлены результаты проведенных длительных (10000 часов) испытаний на стойкость к окислению циркониевого сплава Э-125 и его сварных соединений в условиях, имитирующих работу канальных труб в графитовой кладке РБМК (температура 350 °С, азотно-гелиевая смесь с продуктами окисления графита). Построены кривые кинетики окисления металла, выполнены металлографические исследования опытных образцов.

*Исследование стойкости к окислению в азотно-гелиевой среде сварных соединений труб СУЗ РБМК из сплава Э-125: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: О.Н. Абакумова, Г.В. Дмитриев, М.И. Плышевский, А.Т. Руденская. — Электрогорск, 1985. — 28 с. — Инв. № 31.313.*

### **Исследование коррозионной стойкости сварных соединений сплавов циркония в потоке перегретого пара**

*Отв. исполнители: инженеры Г.С. Полякова (ЭНИС),*

*И.И. Акимов (предприятие п/я А-7291), Н.М. Александрова (ЭНИН)*

Представлены результаты проведенных длительных (5700–11300 часов) стендовых коррозионных испытаний образцов труб из сложнoleгированных жаропрочных циркониевых сплавов ЦЖД (Zr-Fe-Mo-Cr-W), ВЦ-66 (Zr-Fe-Cr-Cu) и их сварных соединений в потоке перегретого пара (температура 400–450 °С, давление до 8,5 МПа), содержащего 20–40 мг/кг газообразного кислорода.

*Исследование коррозионной стойкости сварных соединений сплавов циркония в потоке перегретого пара: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: Г.С. Полякова, И.И. Акимов, Н.М. Александрова. — Электрогорск, 1985. — 24 с. — Инв. № 111/85.*

## **Исследование коррозионной стойкости сварных соединений циркония, выполненных электродуговой сваркой в защитных средах различного состава**

*Отв. исполнители: инженер Н.В. Нестерова (ЭНИС), инженер Г.В. Дмитриев (предприятие п/я А-7291), инженер Н.М. Александрова (ЭНИИ)*

Представлены результаты коррозионных испытаний (~3000 часов) в статических условиях в воде при температуре 300 °С и давлении до 8,6 МПа сварных соединений циркониевых сплавов марки 100 (йодидный цирконий), Э-110, Э-125, выполненных электродуговой сваркой в камере с контролируемой защитной атмосферой с целью изучения влияния содержания азота и кислорода в защитных инертных газах (аргон и гелий) на коррозионную стойкость таких сварных соединений (выполненных в институте электросварки им. Е.О. Патона).

*Исследование коррозионной стойкости сварных соединений циркония, выполненных электродуговой сваркой в защитных средах различного состава: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: Н.В. Нестерова, Г.В. Дмитриев, Н.М. Александрова. — Электрогорск, 1985. — 25 с. — Инв. № 112/85.*

## **Экспериментальное исследование теплогидравлической эффективности интенсификаторов теплообмена с цилиндрическими ячейками для реактора РБМК**

*Отв. исполнитель инженер Е.В. Столяров (ЭНИС); исполнители: инженер А.Ф. Чалых (ЭНИС), инженер Т. Югай (ЭНИИ), канд. техн. наук А.И. Емельянов (предприятие п/я А-7291)*

В рамках работы получены экспериментальные данные по кризису теплоотдачи, гидравлическому сопротивлению и теплоотдаче в закризисной области в пучках с интенсификаторами теплообмена и штатными решетками РБМК-1000 в каналах диаметром 80 и 81,7 мм и в канале диаметром 80 мм со смещением оси пучка относительно оси канала на 0,5 мм. Показана высокая теплогидравлическая эффективность интенсификаторов теплообмена с цилиндрическими ячейками, имеющими конструктивные элементы, позволяющие осуществлять интенсивное перемешивание потока теплоносителя вокруг всей сборки каждого стержня в отдельности.

*Экспериментальное исследование теплогидравлической эффективности интенсификаторов теплообмена с цилиндрическими ячейками для реактора РБМК: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я А-7291; исполн.: Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, Т. Югай, А.И. Емельянов. — Электрогорск, 1985. — 114 с. — Инв. № 22.82.*

### **Экспериментальное обоснование «Технических предложений по повышению надежности и экономичности СПП-500-1 на АЭС с РБМК-1000**

*Отв. исполнители: инженеры В.Н. Шмаков, Г.И. Манойленко (ЭНИС), инженеры К.А. Малышев, В.А. Виноградов, Н.П. Майданик (ВНИИАЭС)*

Исследованы температурные режимы входного участка полномасштабной модели модуля СПП-500-1 со вставками-плёнкосрывателями и без них при увеличении влажности нагреваемого пара до 26 % и эффективность вставки, срывающей пленку жидкости со стенки входного участка на натурной модели при опускном и подъёмном движении нагреваемого пара и режимных параметрах, характерных для работы СПП-500-1.

*Экспериментальное обоснование «Технических предложений по повышению надежности и экономичности СПП-500-1 на АЭС с РБМК-1000»: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; исполн.: В.Н. Шмаков, Г.И. Манойленко, К.А. Малышев и др. — Электрогорск, 1986. — 106 с. — Инв. № 2.357.*

### **Исследование коррозионной стойкости циркониевого сплава в потоке перегретого пара при температурах 315–600 °С**

*Отв. исполнители: инженер Г.С. Полякова (ЭНИС), И.В. Удалова (предприятие н/я Р-6575), Н.М. Александрова (ЭНИН)*

Представлены результаты испытаний коррозионной стойкости нового жаропрочного циркониевого сплава с катодным типом легирования (3,0% Sn, 1,0% Fe, 1,0% Cr, 0,4% W) в потоке перегретого пара при температуре 315–500 °С, давлении 7–8 МПа и  $C_{O_2} = 20 \div 30$  мг/кг в течение ~ 3000 часов.

*Исследование коррозионной стойкости циркониевого сплава в потоке перегретого пара при температуре 315–600 °С: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие н/я Р-6575; исполн.: Г.С. Полякова, И.В. Удалова, Н.М. Александрова. — Электрогорск, 1986. — 13 с. — Инв. № 128/86.*

### **Расчетное обоснование возможности использования барабана-сепаратора диаметром 2,6 м при параметрах теплофикационного режима энергоблока РБМК-1000**

*Руководитель работы канд. техн. наук Л.К. Тихоненко (ЭНИС); исполнители: канд. техн. наук Г.В. Осокин (ЭНИС), Р.В. Васильева, И.С. Дубровский, Б.А. Кольчугин (ЭНИН), канд. техн. наук В.Б. Карасев, О.Ю. Новосельский, инженеры В.К. Сафонов (предприятие н/я А-7291), М.Б. Стрельников (предприятие н/я А-7755)*

Дано расчётное обоснование возможности использования барабана-сепаратора (БС) диаметром 2,6 м при работе энергоблока РБМК-1000 в теплофикационном режиме с паропроизводительностью БС 1825 т/ч, что в 1,26 раз превышает номинальную паропроизводительность штатного БС. Расчётами показано, что при паропроизводительности 1825 т/ч штатная сепарационная схема БС обеспечивает получение пара необходимого ка-

чества, а оперативный запас воды 60,1 м<sup>3</sup> больше требуемого по условиям аварийного замещения объёма пара в контуре МПЦ.

*Расчетное обоснование возможности использования барабана-сепаратора диаметром 2,6 м при параметрах теплофикационного режима энергоблока РБМК-1000: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я А-7755; рук. Л.К. Тихоненко; исполн.: Г.В. Осокин, Л.К. Тихоненко, Р.В. Васильева и др. — Электрогорск, 1986. — 40 с. — Инв. № 12.323.*

## **Ресурсные испытания перегревательной кассеты и канала реактора РБМ-КП**

*Руководитель работы инженер В.Д. Байнякшин (ЭНИС); отв. исполнители: О.А. Ярмоленко, Т.С. Максимова (предприятие п/я А-7291); исполнители: техник Т.В. Корючева (ЭНИС), инженеры А.Н. Семенов, Л.С. Джафарова, А.М. Смоленцев, А.Ф. Лунин, канд. техн. наук М.И. Плышевский, инженеры В.М. Монаков, Л.Т. Руденская, С.А. Кочергин, С.В. Денисов (предприятие п/я А-7291)*

Проведены ресурсные испытания четырёх полномасштабных макетов: технологического канала реактора РБМ-КП и трёх двухкожуховых перегревательных кассет для исследования вибраций элементов конструкции, ресурсных испытаний и гидравлического сопротивления кольцевого зазора при продувке данных конструкций перегретым паром с давлением 7,85 МПа и температурой 360 °С с целью комплексной оценки работоспособности конструкций, в том числе коррозионной стойкости материалов и их сварных соединений, а также величин пульсаций давления рабочей среды, вибронпряжений и гидравлических сопротивлений кассеты. Работоспособность канала оценивалась на базе 5685 часов, кассеты — 3017 часов ресурсных испытаний.

*Ресурсные испытания перегревательной кассеты и канала реактора РБМ-КП: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; рук. В.Д. Байнякшин; исполн.: О.А. Ярмоленко, Т.С. Максимова, Т.В. Корючева и др. — Электрогорск, 1986. — 54 с. — Инв. № 11.325.*

## **Экспериментальное исследование струйного конденсатора для системы локализации аварии с потерей теплоносителя применительно ко второй очереди Игналинской АЭС**

*Руководитель работы: канд. техн. наук А.П. Прошутинский (ЭНИС); исполнители: инженер А.Г. Толмачев (ЭНИС), канд. техн. наук В.Н. Майданик (ВНИИАЭС)*

Работа посвящена экспериментальному обоснованию применения полномасштабного натурного струйного конденсатора в системе локализации проектной аварии при разрыве трубопровода применительно ко второй очереди Игналинской АЭС. Показано, что благодаря практически полной конденсации пара пульсации давления локализованы в объеме камеры смешения и не влияют на конструкционную прочность системы в целом.

*Экспериментальное исследование струйного конденсатора для системы локализации аварии с потерей теплоносителя применительно ко второй очереди Игналин-*

*ской АЭС: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. А.П. Прошутинский; исполн.: А.Г. Толмачев, В.Н. Майданик. — Электрогорск, 1986. — 17 с. — Инв. № 23.330.*

### **Экспериментальное исследование модели внутрикорпусных устройств сепаратора пара диаметром 2,6 м с реактором РБМК-1000 при повышенных паровых нагрузках**

*Отв. исполнители: канд. техн. наук Г.В. Осокин, Л.К. Тихоненко (ЭНИС), канд. техн. наук Р.В. Васильева (ЭНИН), канд. техн. наук В.Б. Карасев, О.Ю. Новосельский, инженеры В.К. Сафонов, М.Б. Стрельников (предприятие н/я А-7291)*

В рамках работы экспериментально изучены сепарационные и гидродинамические характеристики внутрикорпусных устройств барабана-сепаратора (ВКУ БС) диаметром 2,6 м реактора РБМК-1000 на модели с четырьмя подводными патрубками при повышенных паровых нагрузках. Опыты проведены при давлениях 7,05; 4,90 и 2,95 МПа, приведенных скоростях пара на зеркале испарения 0,16–0,41 м/с, массовом уровне над ПДЛ до 350 мм, массовых паросодержаниях на входе 0,14–0,27, в режимах с равномерной и неравномерной (до  $\pm 20\%$ ) загрузкой входных патрубков. Получены опытные данные по величинам влажности отсепарированного пара, скоростям среды в сливном канале гидрозатвора,  $\varphi$  в межкоробовом пространстве и коробе, скоростям и направлениям потока в диффузоре, гидравлическим сопротивлениям элементов ВКУ. Показано, что конструкция ВКУ штатного БС диаметром 2,6 м позволяет реализовать паровые нагрузки, превышающие номинальные на 25% при массовом уровне  $150 \div 50$  мм и достаточном оперативном запасе воды.

*Экспериментальное исследование модели внутрикорпусных устройств сепаратора пара диаметром 2,6 м с реактором РБМК-1000 при повышенных паровых нагрузках: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, предприятие н/я А-7291; исполн.: Г.В. Осокин, Л.К. Тихоненко, Р.В. Васильева и др. — Электрогорск, 1987. — 90 с. — Инв. № 12.334.*

### **Экспериментальное исследование влияния водно-химических параметров на формирование отложений на поверхностях из углеродистой и нержавеющей сталей**

*Отв. исполнители: инженер Н.И. Алаев (ЭНИС), канд. техн. наук А.А. Любимов (ЭНИН); исполнители: инженеры Б.С. Чекалин, В.В. Волков (Курская АЭС)*

Работа посвящена исследованию процессов образования отложений продуктов коррозии на образцах из стали 20 и стали 0Х1810Т и на обогреваемой трубке из стали 0Х18Н10Т в деаэрированной и кислородсодержащей воде (содержание кислорода 0,02–3,0 мг/кг). Теплогидравлические и воднохимические параметры испытаний соответствовали условиям работы КМПЦ реактора РБМК-1000. Обнаружено снижение показателя общей коррозии при дозировании кислорода в 2 раза для нержавеющей стали и в

15 раз для углеродистой. Пассивация углеродистой стали происходит при концентрации кислорода менее 0,1 мг/кг. При дозировании кислорода интенсивность отложения оксидов на греющих поверхностях практически не зависит от величины  $\varphi$ .

*Экспериментальное исследование влияния водно-химических параметров на формирование отложений на поверхностях из углеродистой и нержавеющей стали: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Н.И. Алаев, А.А. Любимов, Б.С. Чекалин, В.В. Волков. — Электрогорск, 1987. — 77 с. — Инв. № 21.332.*

### **Ресурсные коррозионно-эрозионные испытания сплавов на основе циркония в потоке перегретого пара**

*Отв. исполнитель инженер Е.В. Гридчин (ЭНИС)*

Представлены результаты ресурсных испытаний (10000 часов) образцов сварных соединений и колец циркониевых сплавов Э-125 и композитов сплав 110, армированный Nb проволокой, проведенных в специально сооружённом стенде в потоке перегретого пара ( $T=340\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=5,5\text{ МПа}$ ,  $W_0=50\text{ м/с}$  с содержанием кислорода  $\sim 1\text{ мг/кг}$ ).

*Ресурсные коррозионно-эрозионные испытания сплавов на основе циркония в потоке перегретого пара: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; исполн. Е.В. Гридчин. — Электрогорск, 1987. — 38 с. — Инв. № 140/87.*

### **Экспериментальное исследование максимальной проектной аварии модели контура МПЦ РБМК в условиях, приближенных к натурным**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.П. Прошутинский (ЭНИС); исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачев, инженеры Е.В. Меркулов, Л.В. Романова, Н.Н. Фоминых, А.Ю. Сколкин (ЭНИС); соисполнитель инженер В.В. Горшков (ИАЭ)*

Проведено исследование теплогидравлической обстановки в модели КМПЦ РБМК в условиях, приближенных к натурным (давление в сепараторе 70,0 МПа, 6 каналов), а также при резком нарастании мощности на имитаторах ТВС. Делается вывод о том, что полученные результаты могут быть использованы для уточнения программ расчёта аварий с потерей теплоносителя.

Показано, что неравномерность энерговыделения по высоте, близкие к ожидаемым в натурных условиях погонная теплоемкость и темп спада расхода в каналы оказывают заметное влияние на процессы обезвоживания, разогрева и охлаждения нагревателей по сравнению с предшествующими экспериментальными исследованиями МПА. Существенное снижение максимальной температуры нагревателя можно ожидать при малых (до 0,5 с) перерывах в подаче теплоносителя.

*Экспериментальное исследование максимальной проектной аварии модели контура МПЦ РБМК в условиях, приближенных к натурным: отчет о НИР / ЭНИС*

*ВНИИАЭС, ИАЭ им. И.В. Курчатова; рук. А.П. Прошутинский; исполн.: А.Г. Лобачев, Е.В. Меркулов, Л.В. Романова и др. — Электрогорск, 1987. — 88 с. — Инв. № 21-23.333.*

### **Сравнительный анализ экспериментальных стендов и аналитическое исследование межканальной теплогидравлической устойчивости РБМК-1500**

*Исполнители: канд. техн. наук А.П. Прошутинский, инженер Н.Н. Трофимова*

Проведены сравнительный анализ действующих экспериментальных стендов, моделирующих реактор РБМК по межканальной теплогидравлической устойчивости (ТГУ), и аналитическое исследование межканальной ТГУ РБМК-1500. Показано, что результаты исследований межканальной ТГУ, полученные в экспериментах, можно переносить на натуру при условии воспроизведения на модели натуральных профилей энерговыделения по высоте АЗ. Даны рекомендации по созданию достаточных запасов до границы межканальной ТГУ РБМК-1500.

*Сравнительный анализ экспериментальных стендов и аналитическое исследование межканальной теплогидравлической устойчивости РБМК-1500: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; исполн.: А.П. Прошутинский, Н.Н. Трофимова. — Электрогорск, 1987. — 65 с. — Инв. № 3.341.*

### **Исследование способов повышения удельного теплосъёма в стержневых сборках реактора типа РБМК**

*Отв. исполнитель инженер Е.В. Столяров (ЭНИС);*

*исполнители: А.Ф. Чалых (ЭНИС), инженер Т. Югай (ЭНИН),*

*канд. техн. наук А.И. Емельянов, инженер С.Ю. Саввин (предприятие н/я А-7291)*

Представлены опытные данные по кризису теплоотдачи, гидравлическому сопротивлению и теплоотдаче в закризисной области и в пучках с интенсификаторами теплоотдачи «осевой закрутки» двух типов в следующем диапазоне режимных параметров:  $P = 7,22-7,58$  МПа,  $\rho W = 575-2101$  кг/м<sup>2</sup>·с,  $X_{\text{вых.}} = 0,28-0,89$ ,  $q$  до 1,1 МВт/м<sup>2</sup>.

*Исследование способов повышения удельного теплосъёма в стержневых сборках реактора типа РБМК: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, предприятие н/я А-7291; исполн.: Е.В. Столяров, А.Ф. Чалых, Т. Югай и др. — Электрогорск, 1987. — 60 с. — Инв. № 22.91.*

### **Экспериментальное исследование распределения жидкости в дисперсно-кольцевом режиме течения в необогреваемом канале**

*Руководитель работы д-р техн. наук Б.И. Нигматулин;*

*отв. исполнитель инженер Н.И. Трубкин (ЭНИС),*

*инженер В.В. Петухов (ВНИИАЭС); исполнители:*

*инженер Ж.С. Струневская (ЭНИС), инженеры В.И. Милашенко,*

*Л.В. Асс-Леонидов (ВНИИАЭС)*

Получены экспериментальные данные по расходам жидкости в пристенной пленке в необогреваемой трубе диаметром 0,0259 м, в следующем диапа-

зоне изменения режимных параметров:  $P=3,0-9,0$  МПа,  $\rho W=750-2000$  кг/м<sup>2</sup>·с,  $X=0,15-0,88$ . Изучено влияние основных режимных параметров на расход жидкости в пристенной плёнке в установившемся адиабатном дисперсно-кольцевом потоке.

*Экспериментальное исследование распределения жидкости в дисперсно-кольцевом режиме течения в необогреваемом канале: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Б.И. Нигматулин; исполн.: Н.И. Трубкин, В.В. Петухов; Ж.С. Струневская и др. — Электрогорск, 1987. — 62 с. — Инв. № 2.343.*

### **Испытание макета кассеты РБМК-1500 со стальными кольцевыми деталями на стенде 17 П ЭНИС**

*Исполнители: техник Т.В. Корючева (ЭНИС), инженеры Л.Т. Руденская, О.Ю. Максимова (предприятие п/я А-7291)*

Представлены результаты ресурсных испытаний макета кассеты РБМК-1500 со стальными деталями в объёме ~ 1647 часов в потоке пароводяной смеси при давлении 70 кгс/см<sup>2</sup>, расходе смеси 23 т/ч, паросодержании 0,36.

*Испытание макета кассеты РБМК-1500 со стальными кольцевыми деталями на стенде 17 П ЭНИС: протокол ЭНИС ВНИИАЭС / исполн.: Т.В. Корючева, Л.Т. Руденская, О.Ю. Максимова. — Электрогорск, 1987. — 7 с. — Инв. № 142/87.*

### **Экспериментальное исследование распределения жидкости в дисперсно-кольцевом режиме течения в обогреваемом канале**

*Отв. исполнители: инженер Н.И. Трубкин (ЭНИС), инженер В.В. Петухов, канд. техн. наук В.И. Милашенко (ВНИИАЭС); исполнитель инженер Ж.С. Струневская (ЭНИС); соисполнитель канд. техн. наук Э.А. Захарова (ЭНИИ)*

Проведено комплексное исследование гидродинамики дисперсно-кольцевых потоков в трубе  $D=0,0132$  м и с обогреваемой длиной  $L_{об} = 1,0$  м. Получены опытные данные по расходам жидкости в пристенной плёнке, гидравлическим сопротивлениям после обогреваемого участка и на участке релаксации в диапазоне изменения режимных параметров: давление 2,0–9,0 МПа; массовая скорость 1000–3000 кг/м<sup>2</sup>·с; недогрев 3–50 °С; плотность теплового потока от  $q = 0 - q_{кр.}$ ; паросодержание на входе в рабочий участок ( $X$ ) 0,19–0,49. Показано влияние основных режимных параметров на расход в пристенной плёнке и гидравлическое сопротивление. Полученные опытные данные могут быть использованы при расчёте процессов тепло-массообмена в обогреваемых каналах ядерных энергетических установок.

*Экспериментальное исследование распределения жидкости в дисперсно-кольцевом режиме течения в обогреваемом канале: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; исполн.: Н.И. Трубкин, В.В. Петухов, В.И. Милашенко др. — Электрогорск, 1986. — 51 с. — Инв. № 21.327.*

## **Ресурсные испытания макета кассеты типа РБМК на стенде 17 П**

*Отв. исполнитель инженер И.Н. Маслова (ЭНИС);*

*исполнители: инженер О.В. Лобиков, техник Т.В. Корючева (ЭНИС), инженеры Г.И. Рослов, В.Н. Гаврилов, канд. техн. наук А.В. Чиркин, инженеры С.А. Кочергин, З.А. Толстых (предприятие п/я А-7291)*

Приведены результаты ресурсных испытаний макета кассеты РБМК с циркониевыми дистанционирующими решетками и концевыми деталями из нержавеющей стали на стенде 17П ЭНИС в объеме 3148 часов. Представлены результаты поэлементного осмотра и металлографических исследований, а также результаты коррозионных исследований циркониевых дистанционирующих решеток, проведенных после завершения основной программы и поэлементной разборки макета ТВС.

*Ресурсные испытания макета кассеты типа РБМК на стенде 17П: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: И.Н. Маслова, О.В. Лобиков, Т.В. Корючева и др. — Электрогорск, 1988. — 43 с. — Инв. № 1.355.*

## **Ресурсные испытания перегревательной кассеты и канала реактора РБМ-КП**

*Руководитель работы инженер В.Д. Байнякшин (ЭНИС);*

*отв. исполнители: инженеры О.А. Ярмоленко, Т.С. Максимова (предприятие п/я А-7291); исполнители: техник Т.В. Корючева (ЭНИС), инженеры А.Н. Семенов, Л.С. Джафарова, А.М. Смоленцев, А.Ф. Лунин, канд. техн. наук. М.И. Плышевский, инженер В.М. Монаков, Л.Т. Руденская, С.А. Кочергин, С.В. Денисов (предприятие п/я А-7291)*

Проверены ресурсные испытания четырёх полномасштабных макетов: технологического канала реактора РБМ-КП и трёх двухкожуховых перегревательных кассет для исследования вибраций элементов конструкции, ресурсных испытаний и гидравлического сопротивления кольцевого зазора при продувке данных конструкций перегретым паром с давлением 7,85 МПа и температурой 360 °С, с целью комплексной оценки работоспособности конструкций, в том числе коррозионной стойкости материалов и их сварных соединений, а также величин пульсаций давления рабочей среды, вибронапряжений и гидравлических сопротивлений кассеты. Работоспособность канала оценивалась на базе 5685 часов, кассеты 3017 часов ресурсных испытаний.

*Ресурсные испытания перегревательной кассеты и канала реактора РБМ-КП: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; рук. В.Д. Байнякшин; исполн.: О.А. Ярмоленко, Т.С. Максимова, Т.В. Корючева и др. — Электрогорск, 1988. — 43 с. — Инв. № 1.355.*

### **Экспериментальное исследование критического истечения теплоносителя через длинные трубы при наличии и отсутствии промежуточного суженного участка**

*Руководитель работы канд. техн. наук С.З. Лутовинов (ЭНИС); исполнители: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко, Е.И. Трубкин (ЭНИС), канд. техн. наук Б.А. Габараев, О.Ю. Новосельский (предприятие п/я А-7291)*

Объектом исследований являлись модели участков циркуляционного контура и аварийных паросбросов реактора РБМК.

Исследованы две трубы постоянного поперечного сечения диаметром 20 мм, длиной 5,8 и 10 м и две трубы такого же диаметра длиной 5,8 м с промежуточным суженным участком диаметром 10 и 12 мм и длиной 0,3 м. Все четыре трубы имели по шесть гибов на 90°. Опыты проведены в диапазоне начальных давлений 0,15–9 МПа, начальных недогрева воды 0–50°С, начальных паросодержаний 0–1 и перегревов пара 0–30°С. Детально исследованы режимы истечения пара при начальных давлениях  $1 \leq$  МПа, представляющие наибольший практический интерес для обоснования защиты реакторного пространства реактора РБМК от превышения допустимого максимального давления.

Установлена зависимость критических расходов водяного теплоносителя от режимных и геометрических параметров. Сопоставление с расчётом по методическим указаниям «МУ 34-70-142-86» позволило уточнить область применения этих корреляций.

*Экспериментальное исследование критического истечения теплоносителя через длинные трубы при наличии и отсутствии промежуточного суженного участка: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; рук.: С.З. Лутовинов; исполн.: Л.К. Тихоненко, Е.И. Трубкин, Б.А. Габараев и др. — Электрогорск, 1988. — 48 с. — Инв. № 1.350.*

### **Экспериментальное исследование фрагмента усовершенствованных внутрикорпусных устройств БС диаметром 2,3 м для энергоблока с реактором РБМК-1000**

*Руководитель работы канд. техн. наук Л.К. Тихоненко (ЭНИС); отв. исполнители: канд. техн. наук Г.В. Осокин (ЭНИС), канд. техн. наук В.Б. Карасев, инженер В.К. Сафонов (предприятие п/я А-7291), канд. техн. наук Р.В. Васильева (ЭНИИ); исполнитель: канд. техн. наук О.Д. Новосельский (предприятие п/я А-7291)*

Представлены результаты экспериментального исследования сепарации и гидродинамики ВКУ БС диаметром 2,3 м реактора РБМК-1000 с ПДЛ и раздающими коллекторами на модели с двумя подводными патрубками. Показано, что исследованная конструкция ВКУ при натуральных параметрах обеспечивает более эффективную сепарацию и позволяет увеличить запас воды в 2 раза по сравнению со штатной конструкцией ВКУ БС.

*Экспериментальное исследование фрагмента усовершенствованных внутрикорпусных устройств БС диаметром 2,3 м для энергоблока с реактором РБМК-1000: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, предприятие*

*п/я А-7291; рук. Л.К. Тихоненко; исполн.: Г.В. Осокин, В.Б. Карасев, В.К. Сафонов и др. — Электрогорск, 1988. — 87 с. — Инв. № 1.348.*

### **Экспериментальное исследование максимальной проектной аварии на модели контура МПЦ РБМК при моделировании САОР питательной водой**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.П. Прошутинский (ЭНИС); исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачев, инженеры Е.В. Меркулов, Л.В. Романова, Н.Н. Фоминых, А.Ю. Скопкин (ЭНИС); соисполнитель: инженер В.В. Горшков (ИАЭ)*

Исследована теплогидравлическая обстановка в модели КМПЦ РБМК при МПА при моделировании различных вариантов «ждуших» САОР питательной водой с целью определения влияния режимно-геометрических факторов модели САОР на процессы обезвоживания, разогрева и охлаждения параллельных парогенерирующих каналов, включая исследования границ теплогидравлической устойчивости системы параллельных каналов.

*Экспериментальное исследование максимальной проектной аварии на модели контура МПЦ РБМК при моделировании САОР питательной водой: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ИАЭ им. И.В. Курчатова; рук. А.П. Прошутинский; исполн.: А.Г. Лобачев, Е.В. Меркулов, Л.В. Романова и др. — Электрогорск, 1988. — 98 с. — Инв. № 3.356.*

### **Повышение надёжности уплотнения ТК, ШАДР реакторов РБМК**

*Отв. исполнители: инженеры О.Н. Абакумова (ЭНИС), В.Н. Иванов (Курская АЭС); исполнитель инженер В.А. Гашенко (ЭНИС)*

Работа посвящена исследованию поведения активных запорных устройств многоразового использования с прокладками из сплава алюминия с 3% никеля и 0,15% титана (АНТ-315) с дополнительным эффектом уплотнения, достигаемым при разогреве до рабочих параметров (температура 543 К), давление 7,9 МПа) в условиях, имитирующих эксплуатационный режим контура реактора РБМК с термокачками.

*Повышение надёжности уплотнения ТК, ШАДР реакторов РБМК: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, Курской АЭС; исполн.: О.Н. Абакумова, В.Н. Иванов, В.А. Гашенко. — Электрогорск, 1988. — 28 с. — Инв. № 4.353.*

### **Стендовые испытания образцов и макетов каналов с разнородными сварными соединениями (цирконий-титан, цирконий-ниобий-сталь и др.)**

*Отв. исполнители: инженеры И.Н. Горячкин, О.Н. Абакумова, Г.С. Полякова, Н.В. Нестерова (ЭНИС), инженер И.И. Акимов (предприятие п/я А-7291), инженер Н.М. Александрова (ЭНИН); исполнители: Г.В. Дмитриев, А.Ф. Лунин, В.М. Монаков, Н.С. Рассошкина, В.П. Сидорова, Н.А. Шеенкова (предприятие п/я А-7291)*

Проведены коррозионные испытания образцов и стендовые испытания макетов, в том числе сварных соединений разнородных металлов (цирко-

ний-титан, цирконий-ниобий-сталь и др.) в перегретом паре (температура 460–500 °С), в пароводяной смеси (температура 315–350 °С) и в смеси сложного состава (с парами воды) при температуре 350 °С.

*Стендовые испытания образцов и макетов каналов с разнородными сварными соединениями (цирконий-титан, цирконий-ниобий-сталь и др.): отчет о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: И.Н. Горячкин, О.Н. Абакумова, Г.С. Полякова и др. — Электрогорск, 1988. — 108 с. — Инв. № 4.101.*

### **Экспериментальное исследование фрагмента сепарационных устройств вертикального сепаратора МКЭР**

*Руководитель работы, отв. исполнитель канд. техн. наук Г.В. Осокин (ЭНИС); отв. исполнители: канд. техн. наук В.Б. Карасёв, В.К. Сафонов (предприятие п/я А-7291), д-р техн. наук А.Г. Агеев, канд. техн. наук Р.В. Васильева (ЭНИН); исполнители: канд. техн. наук О.Ю. Новосельский, инженер Е.Г. Семикина (предприятие п/я А-7291)*

Представлены результаты экспериментальных исследований сепарационных характеристик внутрикорпусных устройств парового объёма модели вертикального сепаратора реактора МКЭР. опыты выполнены при давлении 6,86 и 2,94 МПа, приведенной скорости пара 0,2–0,9 м/с и массовом уровне до 700 мм.

*Экспериментальное исследование фрагмента сепарационных устройств вертикального сепаратора МКЭР: отчет о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я А-7291; рук. Г.В. Осокин; исполн.: В.Б. Карасёв, В.К. Сафонов, А.Г. Агеев и др. — Электрогорск, 1989. — 46 с. — Инв. № 1.362.*

### **Экспериментальное исследование теплогидравлической устойчивости в модели контура МПЦ в условиях сниженных давлений**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.П. Прошутинский; исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачев, инженеры Е.В. Меркулов, Л.В. Романова, Н.Н. Фоминых, А.Ю. Скопкин (ЭНИС); соисполнитель инженер А.А. Шпаковский (ИАЭ)*

Представлены результаты экспериментальных исследований по определению границы теплогидравлической колебательной устойчивости в модели КМПЦ с идентичными каналами для двух вариантов дросселирования в условиях послеаварийного охлаждения активной зоны РБМК, а также экспериментальных исследований в области неустойчивости. Показано, что в области неустойчивости существуют три вида колебаний, характер которых зависит от паросодержания на выходе из нагревателей.

*Экспериментальное исследование теплогидравлической устойчивости в модели контура МПЦ в условиях сниженных давлений: отчет о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС, ИАЭ им. И.В. Курчатова; рук. А.П. Прошутинский; исполн.: А.Г. Лобачев, Е.В. Меркулов, Л.В. Романова и др. — Электрогорск, 1989. — 49 с. — Инв. № 3.366.*

### **Исследование теплогидравлических характеристик 36-стержневых сборок при наличии решёток-интенсификаторов с цилиндрическими ячейками для реактора кипящего типа**

*Исполнители: инженеры Е.В. Столяров, В.М. Баринов (ЭНИС), канд. техн. наук Т. Югай (НТЦ), инженер И.В. Охотина (ЭНИН), канд. техн. наук А.И. Емельянов, инженер С.Ю. Саввин (предприятие п/я А-7291)*

Исследованы теплогидравлические характеристики сборок с развитой поверхностью теплоотдачи и интенсификаторами теплообмена в плане усовершенствования конструкции ТВС реактора типа РБМК. Кризис теплоотдачи и закризисная теплоотдача исследованы при следующих режимных параметрах:  $P = 7,02–7,44$  МПа,  $\rho W = 578–2053$  кг/м<sup>2</sup>·с,  $X_{\text{вых.}} = 0,336–0,800$ ,  $q = 0,179–0,681$  МВт/м<sup>2</sup>. По результатам исследования сделана оценка возможности увеличения  $q_{\text{кр.}}$  для полномасштабных 36-стержневых сборок по сравнению с  $q_{\text{кр.}}$  ТВС РБМК-1000.

*Исследование теплогидравлических характеристик 36-стержневых сборок при наличии решёток-интенсификаторов с цилиндрическими ячейками для реактора кипящего типа: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, НТЦ БАЭ ГАЭН СССР, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, предприятие п/я А-7291; исполн.: Е.В. Столяров, В.М. Баринов, Т. Югай и др. — Электрогорск, 1989. — 82 с. — Инв. № 3.365.*

### **Компьютерный банк данных по комплексу экспериментальных исследований стационарного истечения водяного теплоносителя через элементы циркуляционных контуров парогенерирующих установок**

*Руководитель работы, отв. исполнитель канд. техн. наук Л.К. Тихоненко (ЭНИС);*

*исполнители: инженер О.В. Лобиков, техник Р.А. Самигуллина, Н.Д. Дудолодова (ЭНИС)*

Банк содержит данные исследований, выполненных в ЭНИС ВНИИАЭС в период с 1975 по 1989 г., по удельным массовым расходам и локальным характеристикам потоков недогретой и насыщенной воды, пароводяной смеси и пара в 65 экспериментальных каналах. Актив банка 5985 докритических и критических режимов применительно к реакторам РБМК, ВВЭР и АСТ в пяти разделах.

*Компьютерный банк данных по комплексу экспериментальных исследований стационарного истечения водяного теплоносителя через элементы циркуляционных контуров парогенерирующих установок: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Л.К. Тихоненко; исполн.: О.В. Лобиков, Р.А. Самигуллина, Н.Д. Дудолодова. — Электрогорск, 1990. — 291 с. — Инв. № 1.375.*

## Работы применительно к РУ специального назначения

### О некоторых закономерностях коррозионного растрескивания аустенитных нержавеющих сталей в условиях теплообмена с водой высоких параметров

*Научный руководитель темы канд. техн. наук В.Л. Богоявленский (предприятие п/я Р-6575); отв. исполнитель инженер А.П. Шевцов (предприятие п/я Р-6575); исполнители: инженер В.А. Гашенко, техник Е.Б. Горячкина (ЭНИС)*

Представлены результаты испытания аустенитной нержавеющей стали типа Х16Н15 на стойкость к коррозионному растрескиванию в воде высоких параметров ( $P = 10$  МПа,  $T = 280$  °С), содержащей от 0,02 до 10 мг/кг хлоридов и 0,2–0,7 мг/кг кислорода, при воздействии двухосных растягивающих механических напряжений и теплового потока.

Получены зависимости времени до коррозионного растрескивания стали от концентрации хлоридов в воде и величины действующих напряжений.

Получена зависимость скорости концентрирования хлорид-ионов на поверхности стали в условиях ее теплообмена с водой при различных концентрациях хлоридов.

Показано существование взаимосвязи между временем до наступления коррозионного растрескивания стали и удельной поверхностной концентрацией на ней хлорид-ионов.

Показано, что при вводе фосфат-иона скорость накопления хлоридов на поверхности стали уменьшается.

*О некоторых закономерностях коррозионного растрескивания аустенитных нержавеющих сталей в условиях теплообмена с водой высоких параметров: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я Р-6575; рук. В.Л. Богоявленский; исполн.: А.П. Шевцов, В.А. Гашенко, Е.Б. Горячкина. — Электрогорск, 1981. — 50 с. — Инв. № 31.222.*

### Влияние концентрации кислорода и обработки поверхности на стойкость стали ЭИ-844БУ-ИД к хлоридному коррозионному растрескиванию в воде высоких параметров

*Отв. исполнитель инженер В.А. Гашенко (ЭНИС); исполнители: техник Е.Б. Горячкина (ЭНИС); канд. техн. наук А.П. Шевцов, В.С. Кропачёв, инженер И.Н. Тугов (предприятие п/я Р-6575)*

Исследована стойкость стали ЭИ-844БУ-ИД к хлоридному коррозионному растрескиванию (КР) в воде высоких параметров (давление 10 МПа, температура 275 °С), содержащей 7–8 мг/кг хлоридов, при концентрации кислорода  $\leq 0,02$ –1,8 мг/кг, в изотермических условиях и в условиях интенсивного теплообмена при  $q \approx 2$  МВт/м<sup>2</sup>. Получены экспериментальные данные по влиянию на КР исследованной стали предварительной химической обработки поверхности и наличия защитного титанового покрытия.

Установлено также, что с ростом концентрации кислорода устойчивость стали ЭИ-844БУ-ИД к хлоридному КР в воде высоких параметров как в изотермических условиях, так и в условиях интенсивного теплообмена заметно снижается.

*Влияние концентрации кислорода и обработки поверхности на стойкость стали ЭИ-844БУ-ИД к хлоридному коррозионному растрескиванию в воде высоких параметров: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я Р-6575; исполн.: В.А. Гашенко, Е.Б. Горячкина, А.П. Шевцов и др. — Электрогорск, 1985. — 29 с. — Инв. № 31.86.*

### **Исследование коррозионной стойкости хромоникелевых сталей ЭП-991, ЭИ-847 и сплава ЭП-630 в потоке высокоперегретого пара при температуре 600 °С**

*Отв. исполнители: инженер Г.С. Полякова (ЭНИС), канд. техн. наук А.П. Шевцов (предприятие п/я Р-6575), инженер Н.М. Александрова (ЭНИН); исполнители: инженер В.А. Гашенко (ЭНИС), инженер О.А. Коршунова (предприятие п/я Р-6575)*

Исследована жаростойкость сталей ЭП-991, ЭИ-847 и сплава ЭП-630 в потоке высокоперегретого пара при температуре 600 °С, давлении 8,8 МПа и скорости потока — 37 м/с. Отмечена высокая стойкость испытанных материалов к сплошной и межкристаллитной коррозии. На основании полученных данных сталь ЭП-991 и сплав ЭП-630 рекомендуются в качестве перспективных материалов при изготовлении партии опытных ТВЭЛ, предназначенных для эксплуатации в высокоперегретом паре.

*Исследование коррозионной стойкости хромоникелевых сталей ЭП-991, ЭИ-847 и сплава ЭП-630 в потоке высокоперегретого пара при температуре 600 °С: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я Р-6575, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Г.С. Полякова, А.П. Шевцов, Н.М. Александрова и др. — Электрогорск, 1985. — 41 с. — Инв. № 31.312.*

### **Экспериментальное исследование характеристик совмещенных термо- и струйных насосов (ТН-СН) в стационарных условиях**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.К. Тихоненко (ЭНИС); отв. исполнители: инженер Е.И. Трубкин (ЭНИС), канд. техн. наук Э.К. Карасёв, Г.Н. Кудинов, инженер С.И. Васильев (предприятие п/я А-7291)*

Выполнено исследование работы модели термо- и струйного насоса с пятью вариантами проточной части. Получены напорно-расходные характеристики в диапазоне давлений 0,3–7,0 МПа и при температуре питательной воды 50–60 °С. Даны экспериментально обоснованные рекомендации по улучшению напорно-расходных характеристик ТН–СН.

*Экспериментальное исследование характеристик совмещенных термо- и струйных насосов (ТН-СН) в стационарных условиях: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; рук. А.К. Тихоненко; исполн.: Е.И. Трубкин, Э.К. Карасёв, Г.Н. Кудинов, С.И. Васильев. — Электрогорск, 1987. — Инв. № 1.93.*

## **Экспериментальное исследование статических характеристик сепарационного парожидкостного насоса с кольцевой сепарационной полостью на пароводяной смеси**

*Руководители работы: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко (ЭНИС), канд. техн. наук Л.Р. Кеворков (предприятие п/я А-1758); исполнители: канд. техн. наук С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин (ЭНИС), Д.А. Михайлов (предприятие п/я А-1758)*

Исследована работа в разомкнутом контуре модели сепарационного парожидкостного насоса (СПЖН), с кольцевым сепаратором при различных углах поворота потока в последнем. Получены напорно-сепарационные характеристики модели в диапазоне начального давления 2–7 МПа и начальном массовом паросодержании 0,02–0,3 при докритических перепадах давления на разгонном сопле. Даны рекомендации по реконструкции проточной части модели, направленные на улучшение её характеристик при низких давлениях и обеспечению работы в замкнутом циркуляционном контуре с возвратом в контур конденсата, отводимого от модели пара.

*Экспериментальное исследование статических характеристик сепарационного парожидкостного насоса с кольцевой сепарационной полостью на пароводяной смеси: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-1758, предприятие п/я А-7755; рук.: Л.К. Тихоненко, Л.Р. Кеворков; исполн.: С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин, Д.А. Михайлов. — Электрогорск, 1987. — 85 с. — Инв. № 12.331.*

## **Отработка перспективных конструкций сепараторов пара**

### **Исследование торовых сепараторов**

*Отв. исполнители: инженер В.И. Белов (ЭНИС), инженер В.К. Сафонов (предприятие п/я А-7291); исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Е.А. Лобачёва (ЭНИС); канд. техн. наук И.Т. Серов, В.Б. Карасёв (предприятие п/я А-7291)*

Проведены экспериментальные испытания моделей торового сепаратора, отличающихся длиной «улитки», шириной исходного патрубка, диаметром паровыводящей трубы. Показано, что торовый сепаратор эффективнее справляется с бросками влажности, чем жалюзийный сепаратор одинаковых с ним геометрических размеров.

*Исследование торовых сепараторов: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие А-7291; исполн.: В.И. Белов, В.К. Сафонов, В.Д. Байнякшин и др. — Электрогорск, 1982. — 41 с. — Инв. № 11.232.*

## **Экспериментальные исследования осевых сепараторов уменьшенной высоты**

*Руководитель работы инженер В.Д. Байнякшин (ЭНИС);  
отв. исполнитель инженер В.И. Белов (ЭНИС);  
исполнители: инженер В.К. Сафонов, канд. техн. наук В.Б. Карасёв  
(предприятие п/я А-7291)*

Целью работы являлось экспериментальное определение характеристик укороченных осевых сепараторов по уносу влаги с отсепарированным паром и захвату пара с водой в опускной канал, которые позволили бы (в случае их удовлетворительных характеристик) уменьшить размеры сепарационной системы. Установлено, что наименьшие удельные паровые нагрузки на сепаратор получены на моделях, представляющих собой первые ступени наиболее полно отработанных ранее сепараторов диаметром 144 и 88 мм с двумя и тремя ступенями соответственно.

*Экспериментальные исследования осевых сепараторов уменьшенной высоты: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; рук. В.Д. Байнякшин; исполн.: В.И. Белов, В.К. Сафонов, В.Б. Карасёв. — Электрогорск, 1984. — 83 с. — Инв. № 11. 269.*

## **Экспериментальные исследования сепараторов с опускным движением смеси**

*Руководитель работы инженер В.Д. Байнякшин (ЭНИС);  
исполнители: инженеры В.И. Белов, Е.А. Лобачева (ЭНИС); канд. техн. наук Э.К. Карасев, инженер В.К. Сафонов*

Проведены испытания полномасштабного инерционного сепаратора с тангенциальным входом и опускным движением потока пароводяной смеси (4 варианта конструкции) с целью экспериментального определения характеристик сепаратора по уносу влаги с паром и захвату пара с отсепарированной водой. В результате испытаний определена оптимальная конструкция, на которой достигнута удельная паровая нагрузка 210 т/(м<sup>2</sup>·ч) при хорошем качестве отсепарированного пара и допустимом захвате пара с водой при давлениях 5,0–7,0 МПа в диапазоне паровых нагрузок 1,2–6 т/ч.

*Экспериментальные исследования сепараторов с опускным движением смеси: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; рук. В.Д. Байнякшин; исполн.: В.И. Белов, Е.А. Лобачева, Э.К. Карасев, В.К. Сафонов. — Электрогорск, 1985. — 72 с. — Инв. № 11.282.*

## **Испытания центробежного сепаратора с конденсатоотводчиком**

*Руководитель работы инженер В.Д. Байнякшин (ЭНИС);  
отв. исполнитель инженер В.И. Белов (ЭНИС);  
исполнители: инженер Е.А. Лобачёва (ЭНИС), инженер В.К. Сафонов,  
канд. техн. наук В.Б. Карасёв (предприятие п/я А-7291)*

Экспериментально определены сепарационные характеристики сепаратора по уносу влаги с паром и проверена работоспособность поплавкового

конденсатоотводчика в условиях периодического отвода непрерывно поступающей отсепарированной воды при давлениях 3,0; 5,0; 7,0 МПа и значениях влажности на входе 4–31 %. Показано, что исследованный сепаратор может использоваться для окончательной осушки пара. Максимальная паровая нагрузка составила 8 т/ч при давлении 7,0 МПа при значениях влажности на входе и выходе соответственно 20 % и 0,1 %.

*Испытания центробежного сепаратора с конденсатоотводчиком: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; рук. В.Д. Байнякишин; исполн.: В.И. Белов, Е.А. Лобачёва, В.К. Сафонов, В.Б. Карасёв. — Электрогорск, 1985. — 39 с. — инв. № 11.314.*

### **Исследование сепарационных устройств вертикального парогенератора и сепаратора-пароперегревателя**

*Отв. исполнители: инженер В.И. Белов (ЭНИС), канд. техн. наук А.Г. Агеев (ЭНИН), инженер А.Н. Хрунич (ЗИО); исполнители: инженер Е.А. Лобачёва (ЭНИС), канд. техн. наук Д.Г. Гостев (ЗИО)*

На пароводяном стенде проведены экспериментальные исследования сепараторов трех конструкций: сепаратора-осушителя ЗИО для промежуточных сепараторов-пароперегревателей (СПП) турбоустановок и пароводяных сепараторов конструкции ЦКТИ и ЭНИН-ЭНИС для вертикальных парогенераторов (ПГВ). Исследования проведены при параметрах, соответствующих натурным для СПП и ПГВ.

*Исследование сепарационных устройств вертикального парогенератора и сепаратора-пароперегревателя: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЗИО; исполн.: В.И. Белов, А.Г. Агеев, А.Н. Хрунич и др. — Электрогорск, 1986. — 86 с. — Инв. № 11.328.*

### **Испытания циклонных сепараторов на опускном и подъёмном движении пара**

*Отв. исполнители: инженер В.И. Белов (ЭНИС), канд. техн. наук А.Г. Агеев (ЭНИН), инженер А.Н. Хрунич (ЗИО); исполнители: инженер Е.А. Лобачёва (ЭНИС), инженер Д.Г. Гостев (ЗИО)*

Экспериментально определены сепарационные и гидравлические характеристики циклонных сепараторов двух конструкций, разработанных и изготовленных ЗИО применительно к условиям СПП, а также определены возможности использования этих сепараторов для осушки греющего пара с давлением 2,3 и 2,9 МПа, идущего из отборов турбины на СПП, Характеристики испытанных сепараторов: сепараторы обеспечили влажность на выходе не более 0,2–0,4% при начальной влажности 10 %, скорости на входе в сепаратор 40 м/с и разделительном давлении 1,0 МПа.

*Испытания циклонных сепараторов на опускном и подъёмном движении пара: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, ЗИО; исполн.: В.И. Белов, А.Г. Агеев, А.Н. Хрунич и др. — Электрогорск, 1988. — 77 с. — Инв. № 1.351.*

## Работы исследовательско-поискового характера

### Обработка датчиков паросодержания для диагностики двухфазных потоков

*Отв. исполнители: инженер Г.Г. Басова (ЭНИС), канд. техн. наук В.И. Гайдуков, инженер Б.А. Хлудов (НПО «Энергия»); исполнители: инженер И.Н. Горячкин, техник Л.П. Еришова (ЭНИС), инженер Ю.К. Берёзко, техники С.И. Волков, В.Н. Королёва (НПО «Энергия»)*

Испытаны конструкции новых типов электровводов, разработанных в ОКБ «Горизонт» НПО «Энергия» и предназначенных для работы в составе датчиков паросодержания и уровня жидкости применительно к условиям двухфазных потоков в проточных частях первого и второго контуров АЭС. Испытания этих конструкций провели в автоклаве и в двухфазном потоке. Показано, что некоторые из предложенных конструкций являются перспективными для применения на АЭС в качестве датчиков уровня, индикаторов вскипания и паросодержания.

*Обработка датчиков паросодержания для диагностики двухфазных потоков: отчёт о НИР / НПО «Энергия»; исполн.: Г.Г. Басова, В.И. Гайдуков, Б.А. Хлудов и др. — Электрогорск, 1981. — 38 с. — Инв. № 21.227.*

### Экспериментальные исследования влияния водно-химических параметров на формирование отложений на поверхностях из нержавеющей стали

*Отв. исполнители: инженеры Н.И. Алаев, В.А. Шаркаева (ЭНИС); канд. техн. наук А.А. Любимов (ЭНИИ)*

Проведены экспериментальные исследования по влиянию водно-химических параметров на формирование отложений на поверхностях из нержавеющей стали. Было проведено 4 опыта длительностью 150–240 ч при следующих параметрах:  $P=7,0$  МПа,  $t_{\text{вх.}}=180-250$  °С,  $\rho W=2000$  кг/м<sup>2</sup>·с,  $q=1$  МВт/м<sup>2</sup>, качество воды: рН=6÷7, оксиды железа 0,02÷0,3 мг/кг, кислород 0,02÷0,3 мг/кг, электропроводимость 1,6–4 мкСм/см, жёсткость — до 30 мкг-экв/кг. Получены данные по влиянию рН теплоносителя и концентрации кислорода на количество отложений. Показано, что количество отложений, формирующихся на необогреваемой и обогреваемой поверхностях, в опытах с дозированием кислорода ( $C_{O_2}=0,2$  мг/кг) в 1,6÷5 раз меньше, чем в опытах на деаэрированной воде.

*Экспериментальные исследования влияния водно-химических параметров на формирование отложений на поверхностях из нержавеющей стали: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Н.И. Алаев, В.А. Шаркаева, А.А. Любимов. — Электрогорск, 1981. — 61 с.*

## **Исследование технологических характеристик неорганических сорбентов для высокотемпературной очистки водного теплоносителя АЭС**

*Научный руководитель работы канд. техн. наук В.А. Мамет (ВНИИАЭС);  
руководитель работы инженер В.А. Гашенко (ЭНИС);  
отв. исполнители: инженер Е.Б. Горячкина (ЭНИС),  
инженер Г.А. Андропова (ВНИИАЭС)*

Проведены в течение ~ 1000 часов испытания смешанной загрузки сорбентов типа ГТД-М и ГТД при температуре 280 °С, давлении 16 МПа при различной скорости фильтрования (от ~ 30 до ~ 150 м/ч). Исследованы четыре варианта загрузок с сорбентами ГДО-М, ГДТ+ГДО, Т-5, губчатый титан при температуре 200 °С. Испытания проводили при исходной концентрации железа 300–500 мкг/кг. Полученные данные позволили оценить железоёмкость испытанных сорбентов, влияние скорости фильтрования на глубину очистки и скорость нарастания перепада давления.

*Исследование технологических характеристик неорганических сорбентов для высокотемпературной очистки водного теплоносителя АЭС: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук.: В.А. Мамет, В.А. Гашенко; исполн.: Е.Б. Горячкина, Г.А. Андропова. — Электрогорск, 1985. — 53 с. — Инв. № 31.311.*

## **Экспериментальное исследование влияния водно-химических параметров на формирование отложений на образцах из нержавеющей и углеродистой стали и на обогреваемой трубке из сплава циркония**

*Отв. исполнители: инженер Н.И. Алаев (ЭНИС),  
канд. техн. наук А.А. Любимов (ЭНИИ),  
исполнители: инженеры Б.С. Чекалин, В.В. Волков (Курская АЭС)*

Экспериментально (опыты длительностью по 160 часов) исследовали процессы образования отложений и их смыва на необогреваемых образцах из стали 08Х18Н10Т и стали 20, а также на обогреваемой трубке из сплава Zr+1 % Nb в деаэрированной и кислородсодержащей воде (соответственно 0,02 мг/кг и 2,0 мг/кг кислорода, при содержании оксидов железа 0,02–0,3 мг/кг, давлении 70 МПа, температуре воды на входе в рабочий участок 250 °С и  $q \sim 1$  МВт/м<sup>2</sup>). Обнаружено значительное снижение массы отложений (в 5–10 раз) на обогреваемых поверхностях, а также смыв до 30–40 % продуктов коррозии с необогреваемых образцов из нержавеющей стали в режимах с дозированием кислорода в теплоноситель.

*Экспериментальное исследование влияния водно-химических параметров на формирование отложений на образцах из нержавеющей и углеродистой стали и на обогреваемой трубке из сплава циркония: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Н.И. Алаев, А.А. Любимов, Б.С. Чекалин, В.В. Волков. — Электрогорск, 1985. — 89 с. — Инв. № 21.315.*

## **Обзор современных методов измерения характеристик двухфазных потоков**

*Руководитель работы канд. техн. наук Л.К. Тихоненко (ЭНИС); исполнители: инженер С.З. Лутовинов (ЭНИС), инженер В.А. Габараев, канд. техн. наук Э.К. Карасев, О.Ю. Новосельский (НИКИЭТ)*

Излагаются результаты обзора применяемых в исследовательской практике последних 10–15 лет методов измерения характеристик двухфазных потоков. Рассмотрены кондуктометрический, акустический, электрохимический, оптический методы, методы изокинетического отбора, проникающего излучения и методы измерения давлений, температур и расходов двухфазной смеси.

Показано, что при соблюдении соответствующих ограничений по температуре, физическим свойствам, фазовому составу и скоростям исследуемой среды в настоящее время имеется возможность более или менее достоверного измерения таких локальных и интегральных характеристик, как истинная плотность, скорости, статические и динамические давления, температуры и расходы фаз и потока в целом.

Отмечается, что ряд интересных и перспективных методов (оптическая голография, компьютерная томография и др.) требуют для своего применения не всегда доступной современной электроники и ЭВМ.

Отмечается также, что при исследовании высокоскоростных двухфазных систем, например критических потоков пароводяной смеси в условиях моделирования аварий с потерей теплоносителя, желательно использовать бесконтактные методы — оптические и методы проникающего излучения, а для измерения расхода двухфазной смеси наиболее точными представляются силовые расходомеры с вращающимся цилиндрическим ротором. При ограниченных возможностях использования дорогостоящей аппаратуры наиболее осуществимым представляется по мнению авторов использование подвижных  $\gamma$ -установок с узким монохроматическим лучом, а для измерения расхода — трубы Вентури или наборы трубок Пито в комбинации со стационарными  $\gamma$  — установками.

*Обзор современных методов измерения характеристик двухфазных потоков: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИ АЭС; рук. Л.К. Тихоненко; исполн.: С.З. Лутовинов, В.А. Габараев, Э.К. Карасев, О.Ю. Новосельский. — Электрогорск, 1985. — 95 с. — Инв. № 12.309.*

## **Исследования по отработке технологии применения комплексообразователей (ОЭДФК) в теплоносителе КМПЦ реактора РБМК**

*Руководитель работы инженер В.А. Гашенко; отв. исполнитель инженер Н.В. Нестерова*

Цели исследования

- Исследование термической устойчивости композиции ОЭДФК 100 г/кг и КОН 27 г/кг в условиях равномерного расхолаживания теплоносителя;

- Определение скорости коррозии различных марок сталей в растворе ОЭДФК + КОН при температурах 100 °С, 150 °С, 180 °С в условиях термической устойчивости ОЭДФК;
- Определение кинетических параметров растворения железоокисных соединений в условиях термической устойчивости ОЭДФК при 150 °С;
- Исследование термической устойчивости композиции ОЭДФК 100 г/кг и КОН 27 г/кг в автоклаве при  $T=150$  °С.

Условия исследований

Среда в контуре – обессоленная вода ( $X \leq 0,8$  мкСм/см),  $P=1$  атм,  $T$  среды = 100; 150; 180 °С. Длительность исследований: суммарное время эксперимента – 150 часов, время циркуляции композиции в контуре – 100 часов.

Исследования проводились в экспериментальном стенде № 37 ЭНИС ВНИИАЭС.

В работе представлены результаты исследования термической устойчивости композиции ОЭДФК 100 г/кг и КОН 27 г/кг в условиях равномерного расхолаживания теплоносителя от начальной температуры 200 °С со скоростью 10 °С/час, что соответствует режиму расхолаживания КМПЦ РБМК.

*Исследования по отработке технологии применения комплексообразователей (ОЭДФК) в теплоносителе КМПЦ реактора РБМК: протокол ЭНИС ВНИИАЭС/рук. В.А. Гашенко; исполн. Н.В. Нестерова. — Электрогорск, 1986. — 7с. — Инв. № 131/86.*

## **Повышение надёжности уплотнения ТК, ШАДР реакторов РБМК**

*Отв. исполнители: инженеры И.Н. Горячкин (ЭНИС), В.Н. Иванов (Курская АЭС)*

Работа посвящена исследованию поведения активных запорных узлов многоразового использования с дополнительным эффектом уплотнения, достигаемого при разогреве узлов до рабочих параметров (температура 543 °К, давление 7,9 МПа) в условиях, имитирующих эксплуатационный режим КМПЦ реактора РБМК с последующими термокачками и воздействиями на них дезактивирующих растворов. Оценена надёжность герметизации запорных узлов ТК и ШАДР в режимах термоциклирования и, в том числе, возможность многоразового использования (с электрохимическим восстановлением) после режима дезактивации.

*Повышение надёжности уплотнения ТК, ШАДР реакторов РБМК: отчёт ЭНИС ВНИИАЭС, Курской АЭС; исполн.: И.Н. Горячкин, В.Н. Иванов. — Электрогорск, 1987. — 29 с. — Инв. № 143/87.*

## **Экспериментальное исследование распределения жидкости в дисперсно-кольцевом режиме течения в необогреваемом канале**

*Руководитель работы д-р техн. наук Б.И. Нигматулин (ВНИИАЭС); отв. исполнитель инженер Н.И. Трубкин (ЭНИС); исполнители: инженеры Ж.С. Струневская (ЭНИС), Л.А. Асс-Леонидов, В.В. Петухов, канд. техн. наук В.И. Милашенко (ВНИИАЭС)*

Представлены экспериментальные данные по расходам жидкости в пристенной плёнке, гидравлическим сопротивлениям при установившемся

дисперсно-кольцевом режиме течения двухфазного потока в необогреваемой трубе диаметром 0,0259 м, при давлениях 2,0–9,0 МПа; значениях массовой скорости 500–2000 кг/м<sup>2</sup>·с. Подтверждено, что зависимость относительного расхода жидкости в пристенной плёнке от основных режимных параметров в установившемся адиабатном дисперсно-кольцевом потоке имеет сложный характер.

*Экспериментальное исследование распределения жидкости в дисперсно-кольцевом режиме течения в необогреваемом канале: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Б.И. Нигматулин; исполн.: Н.И. Трубкин, Ж.С. Струневская, Л.А. Асс-Леонидов и др. — Электрогорск, 1988. — 59 с. — Инв. № 2.358.*

### **Исследование термической стойкости ионообменных материалов**

*Исполнители: инженеры Н.В. Нестерова, В.А. Гашенко*

В специальном стенде в обессоленной воде с температурой 280 °С проведены испытания термической стойкости ионообменных смол (анионит АВ-17-8 в ОН<sup>-</sup>-форме; катионит КУ-2-8 в Н<sup>+</sup>-форме, матрица ионообменных смол), а также коррозионные испытания различных марок сталей в присутствии продуктов термоллиза полистирол-дивинилбензолной матрицы, определены коэффициенты распределения продуктов термоллиза в системе «пар-вода».

*Исследование термической стойкости ионообменных материалов: протокол ЭНИС ВНИИАЭС / исполн.: Н.В. Нестерова, В.А. Гашенко. — Электрогорск, 1989. — 11 с. — Инв. № 159/89.*

### **Экспериментальное исследование влияния дистанционаторов и интенсификаторов на распределение отложений на поверхности имитаторов ТВЭЛов реактора РБМК**

*Отв. исполнитель инженер Н.И. Алаев (ЭНИС);*

*исполнители: инженер В.А. Шаркаева (ЭНИС), канд. техн. наук М.И. Рябов, инженеры А.И. Купалов-Ярополк, В.Н. Довженко, А.А. Розов, А.Н. Сидоров, Н.Е. Русакова, канд. техн. наук А.А. Носков, инженерв Е.Ю. Параева, А.В. Борунова, А.А. Ерёмченко (предприятие п/я А-7291), канд. техн. наук А.А. Любимов (ЭНИН)*

Представлены результаты серии опытов по исследованию распределения железистоокисных отложений по поверхности имитаторов твэл, снабжённых дистанционирующими или интенсифицирующими элементами в виде ячеек резной конструкции. Опыты с одиночными электрообогреваемыми трубками из сплава циркония проводились на стенде, воспроизводящем теплотехнические и воднохимические параметры реактора РБМК. Длительность одного опыта составляла 100 часов, при этом в теплоносителе поддерживалась повышенная концентрация окислов железа — 0,12 мг/кг.

Обнаружено, что конфигурация ячеек, их высота и шаг установки, а также искусственные дефекты на них практически не влияют на массу и толщину отложений. Количество отложений под ячейками в несколько раз

меньше, чем за их пределами, что объясняется изменением режима теплообмена под ячейками, а также скорости и структуры потока.

*Экспериментальное исследование влияния дистанционаторов и интенсификаторов на распределение отложений на поверхности имитаторов ТВЭЛов реактора РБМК: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; исполн.: Н.И. Алаев, В.А. Шаркаева, М.И. Рябов и др. — Электрогорск, 1989. — 117 с. — Инв. № 2.363.*

### **Экспериментальное исследование характеристик двухфазного потока**

*Отв. исполнители: инженер Т.В. Карпова (ЭНИС), канд. техн. наук Ф.И. Созиев, Э.А. Захарова (ЭНИИ); исполнители: инженеры Г.А. Лобачёв, Е.И. Кухтенкова (ЭНИС), инженер Н.А. Хризолитова (ЭНИИ)*

Экспериментально отработан метод измерения расхода двухфазного потока с помощью двух последовательно установленных стандартных диафрагм в диапазоне режимных параметров:  $P=0,7-2,0$  МПа;  $G_{\text{см}}=0,4-1,4$  кг/с; массовых расходных паросодержаний (X)  $0,1-1,0$ .

*Экспериментальное исследование характеристик двухфазного потока: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; исполн.: Т.В. Карпова, Ф.И. Созиев, Э.А. Захарова и др. — Электрогорск, 1989. — 93 с. — Инв. № 3.373.*

### **Исследование коррозионной стойкости медьсодержащих сплавов**

*Отв. исполнители: инженеры Н.В. Настерова (ЭНИС), Н.М. Александрова; исполнитель канд. техн. наук Е.Б. Мацкевич (ЭНИИ)*

Проведены коррозионные испытания медьсодержащих сплавов (Л68, МНЖ-5-1, БРАЖ-9-1) в деаэрированной воде с концентрацией кислорода  $< 0,02$  мг/кг и в воде, содержащей  $0,1-1,0$  мг/кг кислорода, при температуре  $150-160$  °С применительно к условиям работы подогревателей низкого давления (последние ступени) второго контура АЭС с ВВЭР. Длительность испытаний в каждом режиме — 255 часов.

*Исследование коррозионной стойкости медьсодержащих сплавов: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; исполн.: Н.В. Настерова, Н.М. Александрова, Е.Б. Мацкевич. — Электрогорск, 1990. — 21 с. — Инв. № 153/88.*

### **Экспериментальное исследование распределения жидкости в дисперсно-кольцевом режиме течения в обогреваемом канале**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.Г. Лобачёв; отв. исполнитель инженер Н.И. Трубкин; исполнители: инженеры Ж.С. Струневская, С.В. Зевалкин, О.Г. Карпова*

Приведены экспериментальные данные по расходам жидкости в пристенной плёнке, гидравлическим сопротивлениям в круглом канале  $D=0,0178$  м с обогреваемым участком  $L_{\text{об}}=0,15$  м. Опытные данные получены в следующем диапазоне изменения режимных параметров:

- давление  $P=3,0 \div 9,0$  МПа;
- массовая скорость  $G=1000 \div 1500$  кг/м<sup>2</sup>·с;

- паросодержание на входе в участок  $X_0 = 0,15 \div 0,65$ ;
- плотность теплового потока от  $q=0$  до  $q=q_{кр}$ .

Проведено сопоставление полученных опытных данных настоящей работы с известными подобными данными и расчётными зависимостями.

*Экспериментальное исследование распределения жидкости в дисперсно-кольцевом режиме течения в обогреваемом канале: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. А.Г. Лобачёв; исполн.: Н.И. Трубкин, Ж.С. Струневская, С.В. Зевалкин, О.Г. Карпова. — Электрогорск, 1990. — 61 с. — Инв. № 2.374.*

## Работы прикладного характера

### Испытания на надёжность запорных вентилях Чеховского завода энергетического машиностроения

*Отв. исполнитель инженер Н.Ф. Домрин*

Проведены ресурсные испытания на надёжность запорных вентилях Ду 20 и Ду 65 Чеховского завода энергетического машиностроения при давлении на входе в изделие 12,0 МПа и температуре воды 170 °С; окружающая среда — воздух рабочего помещения с температурой 20–30 °С. Показано, что средний ресурс испытываемой арматуры до первого ремонта составляет  $445 \pm 130$  циклов, что в два раза ниже гарантий завода-изготовителя (1000 циклов). Предложены варианты доработки узлов арматуры, позволяющие поднять средний ресурс наработки вентилях до 3000 циклов.

*Испытания на надёжность запорных вентилях Чеховского завода энергетического машиностроения: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; исполн. Н.Ф. Домрин. — Электрогорск, 1981. — 63 с. — Инв. № 11.225.*

### Результаты испытаний обратного клапана для раздаточных групповых коллекторов АЭС с аппаратами типа РБМК

*Руководитель работы инженер В.Д. Байнякшин (ЭНИС);*

*отв. исполнители: инженер Н.Ф. Домрин (ЭНИС), инженеры В.С. Григорьев, Е.Ф. Брылёв (предприятие п/я А-7291); исполнители: техники Г.Г. Кузнецова, Т.М. Малафеева, Е.И. Морозова, Р.А. Самигуллина (ЭНИС), канд. техн. наук В.П. Василевский (предприятие п/я А-7291)*

Приведены результаты гидравлических и ресурсных испытаний опытного образца отечественного обратного клапана Ду300, предназначенного для установки в раздаточные групповые коллектора АЭС с реакторами типа РБМК-К, при  $P \leq 0,35$  МПа,  $T = 10$  °С.

Показано, что в процессе ресурсных испытаний разрушений, заеданий и износа узла захлопки клапана не наблюдалось. Расход полного естественного открытия клапана при прямом токе составляет  $150 \pm 5,5$  кг/с ( $540 \pm 20$  т/ч) при перепаде давления  $2 \pm 0,1$  кПа ( $200 \pm 10$  кгс/м<sup>2</sup>), расход срабатывания при

обратном токе воды —  $7,5 \div 8,5$  кг/с ( $28 \div 30$  т/ч). Коэффициент гидравлического сопротивления клапана при полном открытии составил 1,13, перепад давления на клапане при максимальном расходе 375 кг/с ( $1350$  т/ч) не превышает  $14,1 \pm 0,1$  кПа ( $1410 \pm 10$  кгс/м<sup>2</sup>), максимальная частота колебания захлопки имела место при  $90 \div 95$  % открытия и составляла 0,4 Гц. Выявлены конструктивные недоработки по некоторым узлам клапана.

*Результаты испытаний обратного клапана для раздаточных групповых коллекторов АЭС с аппаратами типа РБМК: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, предприятие п/я А-7291; рук. В.Д. Байнякшин; исполн.: Н.Ф. Домрин, В.С. Григорьев, Е.Ф. Брылёв и др. — Электрогорск, 1982. — 51 с. — Инв. № 11.234.*

### **Испытание струйных систем для использования в качестве быстродействующих и измерительных устройств РБМК**

*Исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачёв, А.П. Прошутинский, инженеры Г.Г. Басова, Е.И. Кухтенкова (ЭНИС); инженеры В.Г. Иванов, С.Г. Виногоров, В.П. Симонов, А.С. Курочкин (ИАЭ)*

Представлены результаты испытаний струйного расходомера, струйного переключателя расхода и быстродействующего клапана на питательной воде с параметрами:  $P=5 \div 8$  МПа,  $t=50 \div 190$  °С.

*Испытание струйных систем для использования в качестве быстродействующих и измерительных устройств РБМК: протокол ЭНИС ВНИИАЭС, ИАЭ им. И.В. Курчатова / исполн: А.Г. Лобачёв, А.П. Прошутинский, Г.Г. Басова и др. — Электрогорск, 1983. — 38 с. — Инв. № 52/82.*

### **Проведение межведомственных испытаний опытных образцов клапанов УФ 26051-50**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Н.Ф. Домрин (ЭНИС), А.Р. Кравченко (УФ ЦКБА)*

Испытания проводились на технической воде (давление до 5 кгс/см<sup>2</sup>, температура до 25 °С) — при определении коэффициента гидравлического сопротивления клапана в состоянии полного открытия; на питательной воде (давление ~ 175 кгс/см<sup>2</sup>, температура 330 °С) — при наработке циклов. Проверка герметичности затворов клапанов осуществлялась подачей воздуха «на» и «под» золотник при давлении 200 кгс/см<sup>2</sup>.

*Проведение межведомственных испытаний опытных образцов клапанов УФ 26051-50: протокол ЭНИС ВНИИАЭС / исполн.: В.Д. Байнякшин, Н.Ф. Домрин, А.Р. Кравченко. — Электрогорск, 1983. — 83 с. — Инв. № 68/83.*

### **Испытание трёх каналов расходомера ШРГП-55-50 на стенде 17п ЭНИС**

*Исполнитель инженер В.Д. Байнякшин*

На циркуляционном стенде проведены испытания трёх каналов расходомера ШРГП-55-50 и двух образцов первичного преобразователя паросохранения ПрП.13.00.

*Испытание трёх каналов расходомера ШРГП-55-50 на стенде 17н ЭНИС: акт ЭНИС ВНИИАЭС / исполн. В.Д. Байнякшин. — Электрогорск, 1983. — 11 с. — Инв. № 70/83.*

## **Испытание в ЭНИС опытного образца клапана С26517-100**

### **на «холодные» термоциклы**

*Исполнитель инженер В.Д. Байнякшин*

Отмечается, что для выполнения «холодных» термоударов на клапане С26517-100 в ЭНИС НПО «Энергия» спроектирован и сооружён экспериментальный стенд 52Т обеспечивающий следующие условия испытаний:

- подводящий трубопровод Ду 100 мм, отводящий — Ду 150,
- разогрев открытого клапана паром до 360 °С при давлении близком к атмосферному,
- подача в испытываемый клапан воды расходом до 49 т/ч при температуре 30÷60 °С и давлении близком к атмосферному,
- регистрация температур в различных точках.

Выполнены 10 термоциклов с подачей «холодной» воды под золотник и 3 термоцикла с подачей воды на золотник клапана.

В процессе нагревов и охлаждений открытого клапана не обнаружено появления неплотностей в соединении корпус-стойка, однако, в таком же клапане, подвергнувшись на стенде одностороннему нагреву в закрытом состоянии, после 10-го термоцикла появилась неплотность разъёма и обнаружено ослабление затяжки крепежа со стороны прогреваемого патрубка.

*Испытание в ЭНИС опытного образца клапана С26517-100 на «холодные» термоциклы: акт ЭНИС НПО «Энергия» / исполн. В.Д. Байнякшин. — Электрогорск, 1985. — 31 с. — Инв. № 106/85.*

## **Испытания в ЭНИС опытных образцов клапанов С26517-100**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Н.Ф. Домрин*

Представлены результаты межведомственных испытаний на цикличность («открыто-закрыто») при рабочих параметрах воды (давление 180 кгс/см<sup>2</sup>, температура 330 °С, расход 2,5±0,5 м<sup>3</sup>/ч) электроприводных сильфонных клапанов С26517-100 (завод-изготовитель НПО «Криогенмаш»).

*Испытания в ЭНИС опытных образцов клапанов С26517-100: протокол ЭНИС ВНИИАЭС / исполн.: В.Д. Байнякшин, Н.Ф. Домрин. — Электрогорск, 1985. — 14 с. — Инв. № 99/85.*

## **Коррозионные испытания (~ 600 часов) уплотняющей многослойной прокладки типа ЦМП с искусственно созданным дефектом**

*Исполнители: инженеры В.А. Гашенко, О.Н. Абакумова (ЭНИС); В.Н. Иванов (Курская АЭС)*

На специально созданном стенде проведены коррозионные испытания (~ 600 часов) уплотняющей многослойной прокладки типа ЦМП с искусственно созданным дефектом и сопряжённых с ней уплотняющих элементов

затвора при параметрах: давление в контуре 7,8 МПа, температура воды 270 °С.

*Коррозионные испытания (~ 600 часов) уплотняющей многослойной прокладки типа ЦМП с искусственно созданным дефектом: протокол ЭНИС ВНИИАЭС, Курская АЭС / исполн.: В.А. Гашенко, О.Н. Абакумова, В.Н. Иванов. — Электрогорск, 1985. — 6 с. — Инв. № 103/85.*

### **Повторные межведомственные ресурсные испытания опытного образца запорного сильфонного клапана С.96547-150 (зав. № 1)**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Н.Ф. Домрин*

Проведены повторные межведомственные ресурсные испытания опытного образца запорного сильфонного клапана С.96547-150 (зав. № 1) после его ремонта изготовителем. Клапан испытан на наработку гарантийного ресурса (500 циклов) при подаче воды на золотник в состоянии его поставки из ПО «Пензкомпрессормаш» при следующих параметрах: давление на входе в клапан  $155 \pm 5$  кгс/см<sup>2</sup>, температура воды  $330 \pm 5$  °С, расход воды через клапан  $2,5 \pm 0,5$  м<sup>3</sup>/ч; перепад давления на клапане при циклении 10 кгс/см<sup>2</sup>.

*Повторные межведомственные ресурсные испытания опытного образца запорного сильфонного клапана С.96547-150 (зав. № 1): протокол ЭНИС, НПО «Энергия» / исполн.: В.Д. Байнякшин, Н.Ф. Домрин. — Электрогорск, 1985. — 11 с. — Инв. № 97/85.*

### **Испытания датчика для измерения паросодержания на выходе из рабочей кассеты реактора РБМК-1500 ИАЭС на стенде 17п ЭНИС**

*Руководитель работы инженер В.Д. Байнякшин;*

*отв. исполнитель инженер И.Н. Маслова; исполнитель техник Т.В. Корючева*

Представлены результаты испытаний датчика для измерения паросодержания на выходе из рабочей кассеты реактора РБМК-1500 разработки НПО ЦКТИ при давлении в рабочем участке 6,0–7,5 МПа, массовом расходе через клапан 18–36 т/ч и массовом паросодержании (X) 0–60 %.

*Испытания датчика для измерения паросодержания на выходе из рабочей кассеты реактора РБМК-1500 ИАЭС на стенде 17п ЭНИС: протокол ЭНИС ВНИИАЭС / рук. В.Д. Байнякшин; исполн.: И.Н. Маслова, Т.В. Корючева. — Электрогорск, 1987. — 4 с. — Инв. № 138/87.*

### **Исследование коррозионной стойкости сталей 20, 08X14МФ и 1X18Н10Т в деаэрированном и кислородсодержащем теплоносителе**

*Отв. исполнители: инженер О.Н. Абакумова (ЭНИС), канд. техн. наук*

*Е.Б. Мацкевич (ЭНИН); исполнители: инженер В.А. Гашенко (ЭНИС),*

*канд. техн. наук И.С. Дубровский (ЭНИН)*

Проведены коррозионные испытания перлитной (сталь 20), аустенитной (1X18Н10Т) и мартенситно-ферритной (08X14МФ) сталей в потоке воды ( $\chi \sim 0,2$  мкСм/см) в условиях бескоррекционного и нейтрально-кислородного водного режима при температурах 60, 150 и 280 °С, скоростях потока 0, 0,4 и 4 м/с и давлении 10 МПа. Установлено, что введение кислорода в

теплоноситель в количестве ~ 0,1 мг/кг снижает скорость коррозии исследованных сталей, при этом коррозия и вынос продуктов коррозии в воду практически прекращается через 300–500 часов. Оксидные плёнки на стали 08Х14МФ обладают высокими защитными свойствами в стояночных условиях, что позволяет рекомендовать эту сталь взамен аустенитной (1Х18Н10Т) и перлитной (сталь 20) для изготовления трубных пучков теплообменных аппаратов и трубопроводов.

*Исследование коррозионной стойкости сталей 20, 08Х14МФ и 1Х18Н10Т в деаэрированном и кислородсодержащем теплоносителе: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; исполн.: О.Н. Абакумова, Е.Б. Мацкевич, В.А. Гашенко, И.С. Дубровский. — Электрогорск, 1987. — 70 с. — Инв. № 4.340.*

### **Экспериментальные исследования в ЭНИС характеристик обратного клапана СКО 300 в нештатных режимах**

*Исполнители: инженеры В.Д. Байнякшин, Н.Ф. Домрин*

На специально созданном стенде проведены экспериментальные исследования по определению расходных характеристик обратного клапана СКО 300 в нештатных режимах работы изделия: при пяти жёстко фиксированных степенях недозакрытия клапана; в условиях имитации отрыва тарелки, лежащей в проточном тракте корпуса обратного клапана; при подаче обратного тока воды; в условиях, когда в проточном тракте до подачи прямого тока воды через клапан находятся «мелкие посторонние предметы» (сварочный грат, песок, куски проволоки диаметром не более 1 мм и длиной до 100 мм). Параметры среды — температура 20 °С, давление перед клапаном до 0,35 МПа, расход до 80 кг/с.

*Экспериментальные исследования в ЭНИС характеристик обратного клапана СКО 300 в нештатных режимах: протокол ЭНИС ВНИИАЭС / исполн.: В.Д. Байнякшин, Н.Ф. Домрин. — Электрогорск, 1987. — 35 с. — Инв. № 136/87.*

### **Ресурсные испытания опытных образцов запорных клапанов АВ21077 015, 020, 025 производства ПО «Курганхиммаш»**

*Руководитель работы инженер В.Д. Байнякшин;  
исполнитель инженер Н.Ф. Домрин*

Представлены результаты ресурсных испытаний опытных образцов запорных клапанов АВ21077 015, 020, 025 производства ПО «Курганхиммаш» с целью подтверждения их работоспособности и количественных показателей надёжности при подаче на них перегретого пара с давлением на входе 3,7 МПа и температурой 375–405 °С.

*Ресурсные испытания опытных образцов запорных клапанов АВ21077 015, 020, 025 производства ПО «Курганхиммаш»: протокол ЭНИС ВНИИАЭС / рук. В.Д. Байнякшин; исполн. Н.Ф. Домрин. — Электрогорск, 1987. — 29 с. — Инв. № 137/87.*

### **Испытание устройства подготовки пробы в системе автоматизированного химического контроля I контура ВВЭР**

*Исполнители: канд. техн. наук А.Г. Лобачёв, инженер Н.И. Алаев (ЭНИС); канд. техн. наук П.Н. Назаренко, инженер Л.Г. Денисова (ВНИИАЭС)*

Представлены результаты испытаний на специально созданном стенде 56хк ЭНИС ВНИИАЭС устройства подготовки пробы (УПП) I контура АЭС с ВВЭР.

Отмечается, что в состав стенда 56хк были включены все блоки УПП, соединённые между собой соответствующими коммуникациями.

*Испытание устройства подготовки пробы в системе автоматизированного химического контроля I контура с ВВЭР: протокол ЭНИС ВНИИАЭС / исполн.: А.Г. Лобачёв, Н.И. Алаев, П.Н. Назаренко, Л.Г. Денисова. — Электрогорск, 1987. — 10 с. — Инв. № 133/87.*

### **Экспериментальное обоснование вихревого конденсатора для СЛА в системе «мокрого» фильтра**

*Научный руководитель канд. техн. наук В.С. Мухин (МЭИ); исполнители: инженер А.Г. Толмачев (ЭНИС ВНИИАЭС), канд. техн. наук В.Н. Майданик, И.И. Кайль (ВНИИАЭС)*

Проведены эксперименты по обоснованию применения натурального модуля вихревого конденсатора с Ду 400 в системе локализации проектной аварии применительно ко второй очереди Билибинской АТЭС. Получены расходные характеристики по работе вихревого конденсатора в диапазоне расходов пара 0,02–10 кг/с. Измерены пульсации давления в баке с охлаждающей водой и на входе пара в ресивер. Проведено экспериментальное исследование системы последовательно включенных струйного инжектора и вихревого конденсатора, моделирующих систему «мокрого» фильтра для предотвращения последствий запроектной аварии на АЭС с плавлением активной зоны. Результаты экспериментов показали надёжную циркуляцию воды в диапазоне начальных температур от 20 до 95 °С, расходов пара от 0,02 до 0,16 кг/с.

*Экспериментальное обоснование вихревого конденсатора для СЛА в системе «мокрого» фильтра: отчёт о НИР / ВНИИАЭС; рук. В.С. Мухин; исполн.: А.Г. Толмачев, В.Н. Майданик, И.И. Кайль — Электрогорск, 1989. — 68 с. — Инв. № 3.370.*

### **Испытания устройств ШАДР с деталями крепежа, поверхностно-упрочнёнными ионно-плазменными покрытиями**

*Исполнители: инженеры В.А. Гашенко, О.Н. Абакумова (ЭНИС); инженер В.Н. Иванов (Курская АЭС); канд. техн. наук Г.М. Калинин, инженер А.Г. Державин (предприятие п/я А-7291)*

Представлены результаты сравнительных стендовых испытаний (~ 1630 часов) крепежа ШАДР из перспективной высокопрочной мартен-

ситностареющей стали 06X13H7D2 (ЭП-898), аустенитной нержавеющей стали марки 08X18H10T и штатного крепежа с ионноплазменным покрытием на основе TiN, ZrN, ZrC в обессоленной воде ( $\chi \sim 1\text{--}2$  мкСм/см, pH  $\sim 6$ ) при рабочем давлении в контуре стенда 7,36 МПа. Температура контурной воды 280 °С.

*Испытания устройств ШАДР с деталями крепежа поверхностно-упрочнёнными ионно-плазменными покрытиями: протокол ЭНИС ВНИИАЭС, Курская АЭС / исполн.: В.А. Гашенко, О.Н. Абакумова, В.Н. Иванов и др. — Электрогорск, 1990. — 8 с. — Инв. № 165/90.*

### **Обследование образца корпуса реактора ВВЭР-1000**

*Руководитель работы канд. техн. наук Ю.Н. Козин;  
исполнители: инженеры Е.Е. Дементьев, О.В. Шатерникова,  
С.Г. Зажмилина*

Отмечается, что основная цель работы — дать количественную оценку выявляемости в сварных швах плит толщиной 100 мм наиболее опасных дефектов типа «трещина в корне шва» и «несплавления по кромке».

*Обследование образца корпуса реактора ВВЭР-1000: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Ю.Н. Козин; исполн.: Е.Е. Дементьев, О.В. Шатерникова, С.Г. Зажмилина. — Электрогорск, 1990. — 12 с. — Инв. № 177/90.*

### **Обследование образцов ГЦК ВВЭР-1000 различными методиками ультразвукового контроля**

*Руководитель работы канд. техн. наук Ю.Н. Козин;  
исполнители: инженеры Е.Е. Дементьев, О.В. Шатерникова,  
С.Г. Зажмилина*

Отмечается, что основная цель работы — количественная оценка выявляемости дефектов в сварном шве полномасштабного образца трубы Ду 850 главного циркуляционного контура (ГЦК) ВВЭР-1000 штатными средствами контроля.

*Обследование образцов ГЦК ВВЭР-1000 различными методиками ультразвукового контроля: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Ю.Н. Козин; исполн.: Е.Е. Дементьев, О.В. Шатерникова, С.Г. Зажмилина. — Электрогорск, 1990. — 15 с. — Инв. № 170/90.*

### **Обследование образца аустенитного сварного шва Ду 500 различными методиками, как этап обследования образца Ду 200 вварки в Ду 500**

*Руководитель работы канд. техн. наук Ю.Н. Козин;  
исполнители: инженеры В.В. Вержиков, О.В. Шатерникова, Т.Ю. Козина,  
С.Г. Зажмилина*

Цель работы — проведение сравнительного анализа выявляемости дефектов методиками ВТИ им. Дзержинского и НИИКИМТ.

*Обследование образца аустенитного сварного шва Ду 500 различными методиками, как этап обследования образца Ду 200 вварки в Ду 500: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Ю.Н. Козин; исполн.: В.В. Вержиков, О.В. Шатерникова, Т.Ю. Козина, С.Г. Зажмилина. — Электрогорск, 1990. — 16 с. — Инв. № 169/90.*

**Выявляемость дефектов методикой «Инструкция по ультразвуковому контролю стыковых аустенитных сварных соединений толщиной свариваемых элементов от 10 до 40 мм» персоналом Кольской АЭС**  
*Руководитель работы канд. техн. наук Ю.Н. Козин (ЭНИС);  
исполнители: инженеры С.Г. Зажмилина, О.В. Шатерникова (ЭНИС),  
Л.Л. Жулев (ВНИИАЭС)*

Цель работы – проведение сопоставительного анализа применения методик ультразвукового контроля сварных швов сталей аустенитного класса. Проанализированы результаты контроля аустенитного сварного шва образца с искусственными заданными дефектами персоналом Кольской АЭС с точки зрения выявления дефектов в сравнении с паспортом на образец с искусственными дефектами различного вида.

*Выявляемость дефектов методикой «Инструкция по ультразвуковому контролю стыковых аустенитных сварных соединений толщиной свариваемых элементов от 10 до 40 мм» персоналом Кольской АЭС»: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Ю.Н. Козин; исполн.: С.Г. Зажмилина, О.В. Шатерникова, Л.Л. Жулев. — Электрогорск, 1990. — 16 с. — Инв. № 169/90.*

# НИОКР ЭНИС ВНИИАЭС–ЭНИЦ ВНИИАЭС 1991–2000 гг.

## Работы применительно к ВВЭР

### **Экспериментальное исследование крупномасштабной модели системы пассивного отвода тепла (СПОТ) с инжектором-конденсатором**

*Руководитель работы канд. техн. наук Е.И. Трубкин;*

*исполнители: канд. техн. наук С.З. Лутовинов, Л.К. Тихоненко;*

*от ВНИИАЭС канд. физ.-мат. наук К.И. Сопленков;*

*от ХАИ: канд. техн. наук В.В. Бредихин, В.Г. Селиванов*

Представлены результаты экспериментального исследования крупномасштабной модели системы пассивного отвода тепла (СПОТ) с инжектором-конденсатором, в том числе теплогидравлические характеристики модели СПОТ в переходных режимах:

- при изменении тепловой нагрузки в имитаторе парогенератора;
- при изменении давления в контуре;
- при изменении температуры питательной воды на инжектор;
- при изменении нагрузки на инжектор;
- в режиме запуска.

Отмечается, что модель СПОТ с инжектором-конденсатором работоспособна в стационарном и переходных режимах и экспериментально доказана возможность запуска инжектора без окон сброса с помощью пусковой ёмкости.

Намечены задачи следующего этапа исследований:

- определение областей устойчивой работы модели СПОТ с инжектором № 12 по давлению в контуре, температуре питательной воды и нагрузке инжектора;
- исследования работоспособности СПОТ при использовании в качестве рабочего тела сухого пара.

*Экспериментальное исследование крупномасштабной модели системы пассивного отвода тепла (СПОТ) с инжектором-конденсатором: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Е.И. Трубкин; исполн.: С.З. Лутовинов, Л.К. Тихоненко, К.И. Сопленков, В.В. Бредихин, В.Г. Селиванов. — Электрогорск, 1991. — 72 с. — Инв. № 1.391.*

## **Состояние современного мирового парка интегральных стендов безопасности АС с PWR и предложения по расширению экспериментальных возможностей ЭНИС в решении проблем обеспечения безопасности АС с ВВЭР-1000**

*Руководитель темы д-р техн. наук Б.И. Нигматулин;*

*исполнитель канд. техн. наук Л.К. Тихоненко*

Приведены результаты обзора задач, концепций и методов моделирования контуров АС с PWR и современного мирового парка экспериментальных интегральных стендов.

Из анализа результатов следует, что наиболее жизнеспособной является концепция: полная высота контура, водяной теплоноситель, номинальное давление.

Делается вывод, что из числа стендов, удовлетворяющих этой концепции, по степени приближения к реальному контуру АС с PWR и полноте моделирования ожидаемых переходных и аварийных режимов выделены ПСБ (ВВЭР-1000) и LSTF (LPWR).

Дано описание LSTF – крупномасштабной экспериментальной установки Японского исследовательского института атомной энергии.

Предложена концепция моделирования и определены основные параметры крупномасштабного интегрального стенда, который существенно расширит экспериментальные возможности ЭНИС по решению проблем безопасности АС с PWR отечественных конструкций, допускающего исследование многомерных эффектов в переходных и аварийных режимах АС с ВВЭР-1000.

*Состояние современного мирового парка интегральных стендов безопасности АС с PWR и предложения по расширению экспериментальных возможностей ЭНИС в решении проблем обеспечения безопасности АС с ВВЭР-1000: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Б.И. Нигматулин; исполн. Л.К. Тихоненко. — Электрогорск, 1991. — 99 с. — Инв. № 1.386.*

## **Полномасштабный стенд безопасности ПСБ-ВВЭР. Описание основного оборудования**

*Руководитель темы доктор техн. наук Б.И. Нигматулин;*

*руководители работы: канд. техн. наук А.Г. Лобачев,*

*А.П. Прошутинский; исполнители: канд. физ.-мат. наук О.И. Мелихов,*

*инженеры А.Ю. Сконкин, Н.Н. Фоминых, Е.В. Павленко, техники Н.В.*

*Сидорова, Н.В. Цуканова*

Дано описание создаваемого в ЭНИС полномасштабного (по высотным отметкам) стенда безопасности для изучения стационарных, аварийных и переходных процессов в первом контуре АЭС с ВВЭР-1000. Представлены объемно-мощностной закон моделирования и основные требования к моделированию, примененные при проектировании ПСБ-ВВЭР. Приведены нодализация схемы стенда по программе TRAC-PF-I и расчеты стационар-

ного состояния стенда, соответствующего номинальному режиму работы АЭС с ВВЭР-1000.

*Полномасштабный стенд безопасности ПСБ-ВВЭР. Описание основного оборудования: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук.: Б.И. Нигматулин, А.Г. Лобачев, А.П. Прошутинский; исполн.: О.И. Мелихов; А.Ю. Сконкин, Н.Н. Фоминых и др. — Электрогорск, 1991. — 67 с. — Инв. № 2.387.*

### **Роль гидрозатвора в переходных режимах контура PWR при малых разрывах холодной ветви. Эксперимент и проблемы моделирования**

*Руководитель темы доктор техн. наук Б.И. Нигматулин; исполнитель канд. техн. наук Л.К. Тихоненко*

Рассмотрено современное состояние проблемы гидрозатвора в формировании переходного режима работы циркуляционных контуров корпусных реакторов с водой под давлением при авариях с малым разрывом холодной ветви. Выявлены ключевые теплогидравлические явления и параметры, управляющие течением двухфазного теплоносителя в гидрозатворе в период его очистки. Предложен принцип моделирования гидрозатвора и определены параметры крупномасштабной модели гидрозатвора ВВЭР-1000 для стенда высокого давления.

*Роль гидрозатвора в переходных режимах контура PWR при малых разрывах холодной ветви. Эксперимент и проблемы моделирования: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Б.И. Нигматулин; исполн. Л.К. Тихоненко. — Электрогорск, 1992. — 77 с. — Инв. № 2.396.*

### **Экспериментальное исследование гидравлического удара в контуре циркуляции**

*Руководитель работы канд. техн. наук Е.И. Трубкин; исполнители: канд. техн. наук С.З. Лутовинов, Л.К. Тихоненко, канд. техн. наук Б.А. Габараев, инженеры В.И. Матюшечкин, А.С. Чичкалов*

Работа посвящена экспериментальному исследованию гидравлического удара в однопетлевом контуре, выполненном из трубы 114×7 мм. Получены характеристики гидравлического удара при скорости потока в трубе 1 и 2 м/с. Установлено, что волновой процесс растянут во времени и для энергетического оборудования опасность может представлять как первый фронт, так и последующие, образуемые наложением прямых и отражённых волн через некоторое время после инициирования гидроудара.

*Экспериментальное исследование гидравлического удара в контуре циркуляции: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Е.И. Трубкин; исполн.: С.З. Лутовинов, Л.К. Тихоненко, Б.А. Габараев, В.И. Матюшечкин, А.С. Чичкалов. — Электрогорск, 1992. — 23 с. — Инв. № 1.393.*

## **Экспериментальное исследование гидравлического удара в контуре циркуляции**

*Руководитель работы канд. техн. наук Е.И. Трубкин;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук О.И. Мелихов, канд. техн. наук С.З. Лутовинов (ЭНИЦ), инженер В.М. Матюшечкин (НИКИЭТ)*

Выполнено исследование характеристик гидравлического удара применительно к первому контуру ВВЭР в специально созданном экспериментальном циркуляционном стенде. Определены импульсы давления акустической волны в реперных точках контура в диапазоне скоростей 1–3,5 м/с. Экспериментально показано, что гидравлический удар может представлять одну из главных опасностей для оборудования первого контура. Проведены численные расчеты гидравлического удара с использованием кода «TRAC», учитывающего неравновесные процессы, имеющие место в контуре при гидравлическом ударе, получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных по амплитудам давления.

*Экспериментальное исследование гидравлического удара в контуре циркуляции: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Е.И. Трубкин; исполн.: О.И. Мелихов, С.З. Лутовинов, В.М. Матюшечкин (НИКИЭТ). — Электрогорск, 1993. — 58 с. — Инв. № 1.400.*

## **Научно-техническое обоснование конструктивных решений РУ стенда ПСБ ВВЭР (разработка имитаторов твэлов косвенного нагрева и технологии установки термопар)**

*Руководитель темы доктор техн. наук Б.И. Нигматулин;*

*руководитель работы канд. техн. наук С.М. Балашов; исполнитель инженер С.В. Зевалкин*

В работе рассмотрены вопросы моделирования тепловых свойств твэла. Приведены результаты испытаний и данные по надежности и ресурсу зарубежных и отечественных имитаторов твэлов реакторов водо-водяного типа. Представлены разработанные конструкции имитаторов твэлов косвенного электронагрева ВВЭР-1000. Изготовлены опытные партии имитаторов твэлов

*Научно-техническое обоснование конструктивных решений РУ стенда ПСБ ВВЭР (разработка имитаторов твэлов косвенного нагрева и технологии установки термопар): отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук.: Б.И. Нигматулин, С.М. Балашов; исполн. С.В. Зевалкин. — Электрогорск, 1993. — 43 с. — Инв. № 1.406.*

## **Разработка матрицы переходных и аварийных режимов АЭС с ВВЭР-1000 для моделирования на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР**

*Руководитель темы д-р техн. наук Б.И. Нигматулин;*

*исполнители: канд. техн. наук Л.К. Тихоненко, инженеры А.Ю. Сконкин, М.Н. Фоминых*

В работе представлены исходные события переходных эксплуатационных и аварийных режимов работы АЭС с корпусными водо-водяными реак-

торами, описаны переходные процессы, зафиксированные на зарубежных интегральных стендах безопасности АЭС с PWR при моделировании аварий.

Рассмотрены и представлены экспериментальные возможности сооружения в ЭНИС полномасштабного интегрального стенда ПСБ-ВВЭР по изучению безопасности АЭС с ВВЭР-1000 (проект В-320).

Дано описание разработанной матрицы переходных и аварийных режимов, предназначенной для моделирования на стенде ПСБ-ВВЭР в течение ближайших 2–3 лет после ввода стенда в эксплуатацию, а именно:

- приведён перечень основных теплогидравлических явлений, которые могут сопровождать представленные в матрице для моделирования на ПСБ переходные и аварийные режимы АЭС с ВВЭР-1000;
- приводится состав матрицы;
- приводятся оценки степени адекватности моделирования двадцати отдельных теплогидравлических явлений.

*Разработка матрицы переходных и аварийных режимов АЭС с ВВЭР-1000 для моделирования на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Б.И. Нигматулин; исполн.: Л.К. Тихоненко, А.Ю. Сконкин, М.Н. Фоминых. — Электрогорск, 1993. — 64 с. — Инв. № 2.403.*

### **Возможности исследования безопасности АЭС с ВВЭР на экспериментальных установках ЭНИЦ и предложения по разработке верификационных матриц для системных теплогидравлических расчётных программ применительно к анализу безопасности ВВЭР**

*Руководитель темы д-р техн. наук Б.И. Нигматулин;  
исполнитель канд. техн. наук Л.К. Тихоненко*

Приведены результаты рассмотренных структурных и масштабных особенностей интегральных стендов безопасности ИСБ и ПСБ с точки зрения полноты моделирования I-го контура ВВЭР-1000 (проект В-320) и приведён перечень переходных и аварийных режимов, предлагаемых к моделированию на ИСБ и ПСБ.

Представлены матрицы переходных и аварийных режимов с оценкой качества моделирования реальных теплогидравлических явлений на ИСБ и ПСБ.

Даны предложения по доработке представленных рабочей группой верификационных матриц существующих системных теплогидравлических расчётных программ применительно к анализу безопасности ВВЭР. Отмечается, что представленные предложения основаны на планируемых и уже приведённых в ЭНИЦ экспериментальных исследованиях.

*Возможности исследования безопасности АЭС с ВВЭР на экспериментальных установках ЭНИЦ и предложения по разработке верификационных матриц для системных теплогидравлических программ применительно к анализу безопасности ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Б.И. Нигматулин; исполн. Л.К. Тихоненко. — Электрогорск, 1994. — 55 с. — инв. № 2.410.*

## Некоторые аспекты моделирования максимальной проектной аварии ВВЭР-1000 на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР

*Руководитель темы д-р техн. наук Б.И. Нигматулин;  
исполнитель канд. техн. наук Л.К. Тихоненко*

Основной целью работы является формулирование метода моделирования реальных каналов истечения и оценка его возможностей применительно к конкретным особенностям ПСБ-ВВЭР.

Отмечается, что созданная по решению международного симпозиума «Исследование безопасности реакторов ВВЭР» (GRS, Кёльн, 7–9 июля, 1992 г.) рабочая группа (CCVM Working Group) к своей 3-й встрече (Боровое, РФ, 21–23 марта 1994 г.) подготовила 2-ю версию трёх перекрёстных верификационных матриц для системных теплогидравлических расчётных программ (компьютерных кодов) применительно к анализу безопасности ВВЭР:

- матрицу 1 для аварий с большими разрывами (Large Break);
- матрицу 2 для аварий с малыми и средними течами (Small and Intermediate Leaks);
- матрицу 3 для переходных режимов (Transients).

Матрицы включают в себя список важнейших теплогидравлических явлений, имеющих место в циркуляционных контурах ВВЭР в переходных и аварийных режимах и моделируемых компьютерными кодами, список установок, могущих обеспечить экспериментальное моделирование соответствующих режимов, и набор символов, характеризующих возможности этих установок и пригодность получаемого на них опытного материала для верификации кодов.

Особое место во всех матрицах отводится интегральным (системным) установкам, обеспечивающим собственно верификацию. В число таких установок включены: РМК (Венгрия), РАСТЕЛ (Финляндия), REWET-III (Финляндия), ИСБ (РФ) и ПСБ (РФ).

Но, как подчёркивается, только ИСБ и ПСБ, по мнению автора, могут обеспечить адекватное моделирование аварий с большими разрывами и получение достоверной опытной информации.

В работе изложена часть усовершенствованной версии инженерной методики расчёта критических расходов водяного теплоносителя через каналы различной формы и масштаба, выполненных в ЭНИЦ и сформулирован метод моделирования реальных каналов истечения, основанный на использовании изложенной методики.

Подчёркивается, что результаты проведённых расчётов подтвердили хорошую точность данного метода моделирования применительно к условиям моделирования на ПСБ-ВВЭР максимальной проектной аварии ВВЭР-1000.

*Некоторые аспекты моделирования максимальной проектной аварии ВВЭР-1000 на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Б.И. Нигматулин; исполн. Л.К. Тихоненко. — Электрогорск, 1994. — 31 с. — Инв. № 2.412.*

**Системный анализ износа входных участков змеевиков в зонах КП и ОК на блоках с ВВЭР-440 и сбор данных по отказам ПВД, разработка рекомендаций по повышению надёжности**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Бараненко; исполнители: канд. техн. наук Т.Е. Щедркина, инженер С.П. Хмарюк, инженер В.Е. Туркин, д-р техн. наук А.С. Шимароков, канд. техн. наук В.П. Кравченко, инженеры А.И. Пионтовский, А.П. Герасимова, Ф.И. Гончарук, С.В. Струсевич, В.В. Сомок*

Объект исследования – изменение толщин стенок теплообменной поверхности подогревателей высокого давления, трубочатка которых выполнена из углеродистой стали, из-за эрозионно-коррозионного износа во время эксплуатации.

Целью работы является системный анализ входных участков змеевиков в зонах КП и ОК на блоках с реакторами ВВЭР-440 и разработка рациональных методов контроля толщин и мероприятий по повышению надёжности ПВД.

Представлены результаты анализа изменения толщин входных участков плоскоспиральных трубных элементов на блоках с реакторами ВВЭР-440 и обоснование мероприятий по повышению надёжности ПВД, а также предложены единообразные формы протоколов для замера толщин и разработаны мероприятия, внедрение которых будет способствовать повышению эксплуатационной надёжности теплообменной поверхности ПВД.

*Системный анализ износа входных участков змеевиков в зонах КП и ОК на блоках с ВВЭР-440 и сбор данных по отказам ПВД, разработка рекомендаций по повышению надёжности: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Бараненко; исполн.: Т.Е. Щедркина, С.П. Хмарюк, В.Е. Туркин и др. — Электрогорск, 1994. — 90 с. — Инв. № 16.415.*

**Расчетно-экспериментальное исследование переходных режимов работы на крупномасштабной модели СПОТ-ИК**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук К.И. Сопленков; исполнители: канд. техн. наук Е.И. Трубкин, канд. физ.-мат. наук И.И. Шмаль, канд. техн. наук С.З. Лутовинов; от ХАИ: И.В. Бредихин, В.Г. Селиванов, инженер И.Б. Маникин*

Исследована работоспособность крупномасштабной модели СПОТ-ИК при  $Q_{тепл} \max \sim 3,5$  МВт в переходных режимах, моделирующих расхолаживание ВВЭР-440. Показано, что из альтернативных схем СПОТ наиболее перспективными являются схемы на базе сепарационного инжектора и инжектора с дозвуковым соплом. Разработана методика расчета СПОТ с ИК.

*Расчетно-экспериментальное исследование переходных режимов работы на крупномасштабной модели СПОТ-ИК: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. К.И. Сопленков; исполн.: Е.И. Трубкин, И.И. Шмаль, С.З. Лутовинов, И.В. Бредихин, В.Г. Селиванов, И.Б. Маникин. — Электрогорск, 1994. — 121 с. — Инв. № 1.407.*

## **Водно-химические испытания и расчеты ПГВ-1000 со штатной и модернизированной схемами водопитания и продувки и разработка вариантов с меньшим содержанием примесей в водяном объеме**

*Руководитель работы доктор техн. наук В.И. Горбуров;  
исполнители: доктор техн. наук В.М. Зорин,  
канд. техн. наук Ю.В. Харитонов, инженер М.М. Каверзнев*

Разработан комплекс программ расчета гидродинамических параметров и распределения концентраций растворимых примесей в объеме кипящего рабочего тела. Проведены вариантыные расчеты для ПГВ-1000 при различных схемах водопитания и продувки, конструктивных особенностях внутрикормовых устройств. Предлагается вариант ПГВ-1000 – усовершенствованный, характеризующийся пониженным содержанием примесей в водяном объеме.

*Водно-химические испытания и расчеты ПГВ-1000 со штатной и модернизированной схемами водопитания и продувки и разработка вариантов с меньшим содержанием примесей в водяном объеме: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Горбуров; исполн.: В.Н. Зорин, Ю.В. Харитонов, М.М. Каверзнев. — Электрогорск, 1994. — 34 с. — Инв. № 12.428.*

## **Сбор и обработка режимных параметров, характеризующих работу парогенераторов с блоками ВВЭР-440, ВВЭР-1000.**

### **Анализ изменений свойств металла шпилек фланцевых разъемов.**

### **Проведение поверочных прочностных расчетов шпилек и гнезд шпилек**

*Руководитель работы доктор техн. наук В.И. Бараненко;  
исполнители: канд. техн. наук Т.Е. Щедеркина,  
канд. техн. наук В.П. Кравченко, инженеры С.П. Храмяк,  
А.И. Пионтковский, А.П. Герасимова, Ф.И. Гончарук, С.В. Струсевич,  
В.В. Сомок, В.Е. Туркин, доктор техн. наук А.С. Шумароков*

Проведен комплексный анализ по выяснению степени влияния конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов, а также водно-химического режима на повреждения парогенераторов АЭС. Проведенные исследования позволили сделать вывод, что материал шпилек на блоках ВВЭР-440 подвержен деформационному старению, в результате которого увеличиваются напряжения в теле шпильки, что оказывает негативное воздействие на их эксплуатационную надежность.

*Сбор и обработка режимных параметров, характеризующих работу парогенераторов с блоками ВВЭР-440, ВВЭР-1000. Анализ изменений свойств металла шпилек фланцевых разъемов. Проведение поверочных прочностных расчетов шпилек и гнезд шпилек: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Бараненко; исполн.: Т.Е. Щедеркина, В.П. Кравченко, С.П. Храмяк и др. — Электрогорск, 1994. — 81 с. — Инв. № 16.427.*

## **Разработка матриц верификации системных теплогидравлических кодов применительно к ВВЭР-1000**

*Руководитель темы доктор техн. наук Б.И. Нигматулин;  
исполнитель канд. техн. наук Л.К. Тихоненко*

Разработаны матрицы верификации теплогидравлических системных кодов применительно к анализу ВВЭР. ЭНИЦ начал работу над матрицами верификации независимо от рабочей группы (РГ) по проблеме «Верификационная матрица теплогидравлических системных кодов применительно к анализу ВВЭР», созданной по инициативе VMFT-IPSN в соответствии с решением Международного симпозиума по исследованию безопасности реакторов ВВЭР (Кельн, 7-9 июля 1992 г.). Председателем РГ являлся К.Лиш (GRS), сопредседателем – М.Рекре (IPSN). Эта работа позволила ЭНИЦ стать первой в России организацией, предоставившей конкретный материал для включения в матрицы, разрабатываемые РГ. Вся последующая работа ЭНИЦ над матрицами верификации кодов ВВЭР проводилась уже в рамках задач, решаемых РГ. Приведены и прокомментированы матрицы верификации версии 5 (Revision 5, October'94). Даны предложения по их доработке.

*Разработка матриц верификации системных теплогидравлических кодов применительно к ВВЭР-1000: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Б.И. Нигматулин; исполн. Л.К. Тихоненко. — Электрогорск, 1994. — 79 с. — Инв. № 2.471.*

## **Статус интегрального стенда безопасности ПСБ-ВВЭР: декабрь-1994** *Б.И.Нигматулин, А.Г.Лобачев, Л.К.Тихоненко*

В работе дан анализ положения дел с реализацией проекта полномасштабного стенда безопасности АЭС с ВВЭР (ПСБ-ВВЭР) за период времени с мая 1992 г. по декабрь 1994 г. Этот период характеризуется регулярными рабочими контактами ЭНИЦ с Европейской Организацией по Экономическому Сотрудничеству и Развитию (ОЕСД), которая после ознакомительной миссии группы экспертов в Электрогорск в мае 1992 г. создала группу поддержки экспериментального проекта ПСБ-ВВЭР ОЕСД (Support Group on the PSB VVER Project) с задачей содействия в его реализации. Отмечается, что ЭНИЦ учел замечания и реализовал ряд рекомендаций экспертов Группы поддержки по улучшению модельных характеристик ПСБ-ВВЭР и расширению его экспериментальных возможностей. Скорейшее сооружение ПСБ-ВВЭР, который в ближайшей перспективе будет единственной российской интегральной установкой мирового класса, моделирующей АЭС с ВВЭР-1000, обеспечит начатые в России работы по созданию и верификации теплогидравлических системных кодов ВВЭР полноценной опытной информацией.

*Нигматулин Б.И., Лобачев А.Г., Тихоненко Л.К.. Статус интегрального стенда безопасности ПСБ-ВВЭР: декабрь-1994. — Электрогорск, 1995. — 37 с. — (Препринт / ЭНИЦ ВНИИАЭС; №Л01-01/1995).*

## **Российская стандартная проблема безопасности №1 (СПБ-1) на стенде ИСБ-ВВЭР. Малая течь 2,4% из выходной камеры реактора**

*Руководитель темы: инженер М.П. Гашенко;*

*исполнители: от ЭНИЦ: канд. техн. наук А.П. Прошутинский,*

*канд. физ.-мат. наук И.И. Шмаль, инженеры И.А. Липатов,*

*Е.В. Столяров, З.А. Лебедева, В.И. Дорофеев, Н.Б. Рыжова,*

*канд. техн. наук. С.П. Никонов;*

*от НИТИ им. А.П. Александрова: канд. техн. наук. Ю.А. Мигров,*

*инженеры И.В. Чернов, Ю.В. Юдов;*

*от РНЦ КИ: инженеры Д.Л. Столчнев, А.П. Никонов;*

*от ОКБ «Гидропресс»: канд. техн. наук. Ю.А. Безруков, С.И. Зайцев,*

*инженер Ю.В. Беляев*

Выполнена первая российская стандартная проблема безопасности (СПБ-1) по верификации теплогидравлических кодов. Работа включала в себя проведение эксперимента на стенде ИСБ-ВВЭР, выполнение расчетов по теплогидравлическим кодам, сопоставление результатов пре- и посттестовых расчетов с экспериментальными данными. Для СПБ-1 выбран эксперимент, моделирующий частичный разрыв трубопровода САОЗ выходной камеры реактора (малая течь 2,4%) с последующим отключением циркуляционных насосов, без подачи охлаждающей воды из САОЗ. Четыре российских организации (РНЦ КИ, НИТИ, ОКБ ГП, ЭНИЦ), а также Forschungszentrum Rossendorf с помощью различных компьютерных кодов выполнили расчеты, которые удовлетворительно предсказывали поведение теплогидравлических параметров в исследуемом процессе.

*Российская стандартная проблема безопасности №1 (СПБ-1) на стенде ИСБ-ВВЭР. Малая течь 2,4% из выходной камеры реактора: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. М.П. Гашенко; исполн.: А.П. Прошутинский, И.И. Шмаль, И.А. Липатов и др. — Электрогорск, 1995. — 317 с. — Инв. № 3.433.*

## **Расчет распространения, накопления и детонации водорода в помещениях локализации аварий АЭС с реакторами В-230**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов;*

*исполнители: канд. техн. наук Д.В. Сиденков, инженер Е.В. Павленко,*

*канд. физ.-мат. наук О.И. Мелихов, техники М.Н. Абрамова, Г.А. Дроздова*

С помощью программного комплекса PRESS проведён анализ распространения и накопления водорода в помещениях локализации аварий на АЭС с реакторами В-230 при авариях с потерей теплоносителей [разрыв ГЦТ Ду 500 (большая течь)]. Определены наиболее опасные помещения, в которых достигаются пожароопасные и даже взрывоопасные значения концентрации водорода. Установлено, что вариант аварии с разрывом ГЦТ Ду 500 является взрывоопасным. Для этого варианта развития аварии кодом CODET проведен расчет распространения детонационных волн по системе помещений, вычислены ударные нагрузки на стенки сооружений. Расчеты

с помощью кода CODET других рассмотренных сценариев аварии выявили отсутствие детонационного горения водорода.

*Расчет распространения, накопления и детонации водорода в помещениях локализации аварий АЭС с реакторами В-230: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Мелихов; исполн.: Д.В. Сиденков, Е.В. Павленко, О.И. Мелихов и др. — Электрогорск, 1995. — 36 с. — Инв. № 13.459.*

### **Разработка генераторов твердых растворимых аэрозолей и летучих форм йода для экспериментальных исследований моделей фильтрующих устройств на экспериментальной установке ЭНИЦ**

*Руководитель работы канд. техн. наук Г.В. Осокин; исполнители: инженеры С.В. Смирнов, Н.В. Нестерова*

Разработаны конструкции генераторов твердых растворимых аэрозолей и летучих форм йода для экспериментальных исследований на стенде ЭНИЦ моделей фильтрующих устройств локализирующих систем безопасности АЭС. Приведены расчеты генераторов, их основные технические характеристики и условия работы. Для генерации аэрозолей использован метод динамического диспергирования растворов различных веществ сжатым воздухом на высоких скоростях.

*Разработка генераторов твердых растворимых аэрозолей и летучих форм йода для экспериментальных исследований моделей фильтрующих устройств на экспериментальной установке ЭНИЦ: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Г.В. Осокин; исполн.: С.В. Смирнов, Н.В. Нестерова. — Электрогорск, 1995. — 36 с. — Инв. № 5.443.*

### **Экспериментальная отработка модернизированной сепарационной схемы ПГВ-1000 с безбарботажными насадками на погруженном листе. Численное моделирование горизонтального парогенератора. Разработка модернизированной системы водопитания и продувки парогенератора**

*Руководители работы: д-р техн. наук В.И. Горбуров, инженер В.И. Белов; исполнители: доктор техн. наук В.М. Зорин, канд. техн. наук Ю.В. Харитонов, инженер М.М. Каверзнев (МЭИ), канд. физ.-мат. наук О.И. Мелихов, Т.В. Карпова, Г.Б. Кожаринова (ЭНИЦ)*

Проведено экспериментальное исследование модернизированной схемы гравитационной сепарации горизонтального парогенератора ПГВ-1000 с использованием безбарботажных насадков на погруженном листе. Испытания насадков проведены при давлении 7,0 и 6,4 МПа. Испытания показали, что применение сепарационной схемы ПГ с безбарботажными насадками на погруженном листе и пароприемным щитом вместо пакетов жалюзи позволяет существенно увеличить запас по паропроизводительности и повысить верхнее предельное положение массового уровня воды в ПГ.

*Экспериментальная отработка модернизированной сепарационной схемы ПГВ-1000 с безбарботажными насадками на погруженном листе. Численное моделирование*

*горизонтального парогенератора. Разработка модернизированной системы водопитания и продувки парогенератора: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук.: В.И. Горбуров, В.И. Белов; исполн.: В.М. Зорин, Ю.В. Харитонов, М.М. Каверзнев и др. — Электрогорск, 1995. — 76 с. — Инв. № 12.445.*

### **Экспериментальное исследование полномасштабной модели СПОТ-ИК с инжектором — конденсатором для АЭС с реакторами ВВЭР-440**

*Исполнители: канд. физ.-мат. наук К.И. Сопленков, канд. техн. наук Е.И. Трубкин, В.Г. Селиванов*

Приведено описание маломасштабного стенда безопасности (СПОТ-ИК) для реакторов ВВЭР-440, позволяющего моделировать процессы расхолаживания остановленного реактора. Стенд рассчитан на параметры: давление в модели парогенераторов до 7,0 МПа; расход слабоперегретого (насыщенного пара) — до 6 кг/с; расход кипящей воды на инжектор до 35 кг/с. Тепловая мощность стенда <15 МВт.

Представлены полученные экспериментально теплогидравлические характеристики контура циркуляции и модели СПОТ-ИК в переходных режимах:

- при изменении давления в модели парогенератора;
- при изменении температуры пассивной среды инжектора;
- при изменении нагрузки на инжектор;
- в пусковых режимах.

Отмечается, что СПОТ-ИК с опытными образцами инжектора обеспечивает расхолаживание реактора в диапазоне давлений  $P > 0,15$  МПа. Делается вывод, что полученные данные могут быть использованы как при проектировании новых энергоблоков с реакторами ВВЭР-440, так и при модернизации действующих. Кроме того, они представляют большой интерес как материал для тестирования вычислительных программ, моделирующих поведение циркуляционных контуров при авариях с отказом «собственных нужд».

*Экспериментальное исследование полномасштабной модели СПОТ-ИК с инжектором-конденсатором для АЭС с реакторами ВВЭР-440: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; исполн.: К.И. Сопленков, Е.И. Трубкин, В.Г. Селиванов. — Электрогорск, 1997. — 152 с. — Инв. № 1.463.*

### **Численный анализ проектных и тяжёлых аварий для действующих АЭС с ВВЭР (программа исследований)**

*Исполнители: д-р техн. наук Б.И. Нигматулин, А.С. Сидоров, д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов, канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов, д-р техн. наук Л.И. Зайчик, канд. техн. наук Г.Г. Яньков, Э.С. Мухтаров, С.М. Петухов*

В работе рассмотрены некоторые сценарии протекания тяжёлых аварий в реакторных установках типа ВВЭР, приводящих к паровым взрывам в корпусе реактора и в подреакторном пространстве (ловушке кориума).

Отмечается, что общим ограничением в стратегии управления тяжёлыми авариями является ограничение по расходу охлаждающей воды, подаваемой сверху на или снизу под расплав на различных стадиях протекания тяжёлой аварии. Это ограничение является тем более существенным, поскольку практически неизученными являются проблемы, связанные с подачей охлаждающей воды в 1 контур в процессе расплавления активной зоны и в процессе перемещения расплава на днище корпуса реактора и далее в бетонную шахту. Во многих случаях, при попытке добиться охлаждения кориума стандартным способом, то есть нерегулируемым расходом, возможно возникновение паровых взрывов большой интенсивности с разрушением оборудования реакторной установки и защитной оболочки. Для предотвращения подобных процессов необходимо проведение исследований условий возникновения и развития паровых взрывов в элементах оборудования реактора и в бетонной шахте с учётом реальной геометрии ВКУ реактора, возможного накопления воды в этих элементах, с учётом реальной геометрии устройств в бетонной шахте и объёмов воды в них и с учётом возможного срабатывания систем безопасности или частичного восстановления функций систем нормальной эксплуатации.

*Численный анализ проектных и тяжёлых аварий для действующих АЭС с ВВЭР (программа исследований): отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; исполн.: Б.И. Нигматулин, А.С. Сидоров, О.И. Мелихов и др. — Электрогорск, 1997. — 61 с. — Инв. № 11.465.*

### **Претестовый расчёт кодом ATHLET режима естественной циркуляции на интегральном стенде ПСБ ВВЭР**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук О.И. Мелихов;  
исполнители: инженер Э.Ю. Щепетильников,  
канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов*

В работе приведены результаты претестовых расчётов режима естественной циркуляции на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР с помощью системного теплогидравлического кода ATHLET. Содержится описание разработанной нодализационной схемы установки и методологии построения входного файла, при этом обсуждаются проблемы, возникающие при математическом моделировании элементов стенда. Получены основные характеристики рассматриваемого процесса при двух конструктивных вариантах модели реактора, а также при двух способах описания модели ПГ.

Показано, что учёт циркуляции в ПГ интенсифицировал теплосъём с трубчатки ПГ, что вызвало более поздний разогрев стержней в активной зоне. Расчёт без решётки, моделирующей блок защитных труб приводов СУЗ, также выявил более поздний разогрев стержней за счёт большей массы теплоносителя в рабочем участке.

Отмечается, что проведённые расчёты выявили работоспособность разработанной нодализационной схемы ПСБ-ВВЭР и её способность моделировать переходные и аварийные режимы.

*Претестовый расчёт кодом ATHLET режима естественной циркуляции на интегральном стенде ПСБ ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. О.И. Мелихов; исполн.: Э.Ю. Щепетильников, В.И. Мелихов. — Электрогорск, 1997. — 83 с. — Инв. № 3/473/1.*

### **Экспериментальное определение гидравлических характеристик элементов первого контура. Однофазная естественная циркуляция**

*Руководитель темы канд. техн. наук И.В. Ёлкин; исполнители: инженеры И.А. Липатов, С.В. Зевалкин, Г.И. Дрёмин, С.А. Галчанская, А.С. Молошиников, А.И. Антонова*

Приведены первые экспериментальные значения гидравлических характеристик элементов первого контура стенда ПСБ-ВВЭР. Их значения в основном соответствуют расчётным значениям.

Приведены результаты эксперимента по режиму однофазной естественной циркуляции в первом контуре стенда для различных значений мощности на канале с имитаторами твэл (максимальная мощность 620 кВт). Показано, что естественная циркуляция устойчива и допускается функционирование установки в этом диапазоне нагрузок без насосов.

Отмечается, что полученные экспериментальные данные могут быть использованы в качестве исходных данных для теплогидравлических системных кодов как для получения стационарных состояний, так и для расчетов динамических режимов по естественной циркуляции.

*Экспериментальное определение гидравлических характеристик элементов первого контура. Однофазная естественная циркуляция: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: И.А. Липатов, С.В. Зевалкин, Г.И. Дрёмин и др. — Электрогорск, 1997. — 83 с. — Инв. № 2.488.*

### **Расчёт кодом ATHLET режима малой течи (5%) из верхней камеры смещения на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук О.И. Мелихов; исполнители: инженер Е.В. Павленко, канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов, инженер Э.Ю. Щепетильников*

Изложены описание стенда ПСБ-ВВЭР и нодализационной схемы, подготовленной для математического моделирования режимов с малой течью на этом стенде с помощью кода ATHLET. Приведены результаты расчёта режима с 5%-течью из верхней камеры смещения модели реактора стенда ПСБ-ВВЭР, выполненного этим кодом.

Приведённый расчёт показал применимость разработанной ранее нодализационной схемы стенда ПСБ-ВВЭР для описания режимов с малой течью теплоносителя в сочетании с использованием современной версии ATHLET 1.1 Cycle C.

Отмечается, что смоделированы характерные явления для аварии типа ЛОСА: три стадии истечения теплоносителя, два режима естественной циркуляции (reflux-condenser и boiler-condenser), очистка гидрозатвора, переток

тепла из второго контура в первый. Вновь отмечено явление, специфичное для проектной конструкции ПСБ-ВВЭР: зависание воды под верхней крышкой модели реактора.

*Расчёт кодом ATHLET режима малой течи (5%) из верхней камеры смешения на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. О.И. Мелихов; исполн.: Е.В. Павленко, В.И. Мелихов, Э.Ю. Щепетильников. — Электрогорск, 1997. — 38 с. — Инв. № 13.479.*

**Российская стандартная проблема безопасности №2 (СПБ-2) на стенде ИСБ-ВВЭР. Течь (11%) из выходной камеры реактора с последующим отключением циркуляционных насосов**

*Руководитель темы инженер М.П. Гашенко; исполнители: от ЭНИЦ: канд. техн. наук А.П. Прошутинский, инженеры Е.В. Столяров, З.А. Лебедева, Н.К. Рыжова, Е.И. Павленко; от РНЦ КИ: инженеры А.П. Никонов, С.А. Крюков; от НИТИ им. А.П. Александрова: канд. техн. наук Ю.А. Мигров, инженеры И.В. Чернов, Ю.В. Юдов; от ОКБ ГП: канд. техн. наук Ю.А. Безруков, инженер С.И. Зайцев; от ЭИС ЗАЭС инженер В.В. Свердлов; от ГНТЦ ЯРБ: инженеры С.В. Лысенко, О.И. Жабин; от GRS научный сотрудник I. Steinborn; от FZR научный сотрудник, канд. техн. наук E. Krepper; от UJV Rez научный сотрудник I. Krhounkova*

Выполнена вторая российская стандартная проблема безопасности (СПБ-2) по верификации кодов. В работе участвовали представители пяти российских (РНЦ КИ, НИТИ, ОКБ ГП, ЭНИЦ, НТЦ ЯРБ) и четырех зарубежных (ЭИС ЗАЭС, FZR, GRS, UJV REZ) организаций. Для верификации кодов использовался эксперимент, проведенный на стенде ИСБ-ВВЭР, имитирующий разрыв трубопровода гидроемкости САОЗ, подключенной к выходной камере реактора (течь 11%), с последующим отключением циркуляционных насосов без подачи охлаждающей воды из САОЗ. Выполнено 6 претест и 10 посттест расчетов по различным расчетным кодам. Пре- и посттест расчеты, в целом, удовлетворительно предсказывают поведение теплогидравлических параметров и времена наступления событий (начало вскипания теплоносителя, обезвоживание элементов контура, ухудшение теплоотдачи в зоне имитаторов твэлов в исследуемом процессе).

*Российская стандартная проблема безопасности №2 (СПБ-2) на стенде ИСБ-ВВЭР. Течь (11%) из выходной камеры реактора с последующим отключением циркуляционных насосов: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. М.П. Гашенко; исполн.: А.П. Прошутинский, Е.В. Столяров, З.А. Лебедева и др. — Электрогорск, 1997. — 482 с. — Инв. № 2.468.*

### **Экспериментальное определение гидравлических характеристик элементов первого контура. Однофазная естественная циркуляция**

*Руководитель работы инженер И.А. Липатов;*

*исполнители: инженеры С.В. Зевалкин, Г.И. Дремин, С.А. Галчанская, А.С. Молошников, А.И. Антонова*

Получены экспериментальные значения гидравлических характеристик элементов первого контура стенда ПСБ-ВВЭР. Проведен эксперимент по режимам однофазной естественной циркуляции в первом контуре стенда при различных значениях мощности на канале с имитаторами твэлов (максимальная мощность 620 кВт). Показано, что естественная циркуляция устойчива и допускается функционирование установки в этом диапазоне нагрузок без насосов.

*Экспериментальное определение гидравлических характеристик элементов первого контура. Однофазная естественная циркуляция: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.А. Липатов; исполн.: С.В. Зевалкин, Г.И. Дремин, С.А. Галчанская и др. — Электрогорск, 1997. — 37 с. — Инв. № 2.492.*

### **Анализ ЭКИ трубопроводов питательной воды, дренажей и конденсатопроводов 1-го и 2-го энергоблоков БалаЭС**

*Руководитель работы доктор техн. наук В.И. Бараненко;*

*исполнители: от ВНИИАЭС: доктор техн. наук В.М. Чаховский, канд. техн. наук И.В. Фролов, инженер В.А. Пахорский;*

*от ЭНИЦ: канд. техн. наук О.Г. Камышников, инженеры Н.И. Алаев, Н.Е. Трубкина, О.В. Шатерникова, техник М.В. Птицина*

Выполнен анализ эксплуатационных условий работы конструкционных сталей в конденсатно-питательном тракте (КПТ) АЭС с ВВЭР-1000. Составлены экспериментально-расчетные зависимости скорости коррозии сталей в условиях КПТ. По результатам ультразвуковой толщинометрии проведен анализ состояния трубопроводов за регулирующими и дросселирующими устройствами. Определены участки с утонением трубопроводов, величины утонений и соотношение участков с утонением и утолщением стенки. Определены размеры утонившихся участков трубопроводов, динамика переноса массы продуктов ЭКИ. Указаны элементы трубопроводов, за которыми требуется более тщательный контроль толщины и, если необходимо, замена. Даны рекомендации по объему УЗ контроля трубопроводов.

*Анализ ЭКИ трубопроводов питательной воды, дренажей и конденсатопроводов 1-го и 2-го энергоблоков БалаЭС: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Бараненко; исполн.: В.М. Чаховский, И.В. Фролов, В.А. Пахорский и др. — Электрогорск, 1997. — 50 с. — Инв. № 16.493.*

**Разработка и создание опытного стенда для испытаний модели фрагмента натурной секции конденсатора-барботера барботажно-вакуумной системы (БВС) локализации аварий на ВВЭР-440**

*Руководитель работы канд. техн. наук Г.В. Осокин;  
исполнители: доктор физ.-мат. наук О.И. Мелихов,  
инженеры А.В. Клинковский, С.В. Смирнов*

Разработан и создан стенд натуральных параметров для испытаний модели фрагмента натурной секции конденсатора-барботера БВС локализации аварий на ВВЭР-440 (В-213) и моделированием геометрических размеров помещений в масштабе 1:100. Рассмотрены вопросы моделирования и масштабирования стенда БК В-213 относительно прототипа – БВС локализации аварий АЭС «Пакш» (Венгрия), представлены технологическая схема стенда, измерительная система, а также система сбора и обработки опытных данных.

*Разработка и создание опытного стенда для испытаний модели фрагмента натурной секции конденсатора-барботера барботажно-вакуумной системы (БВС) локализации аварий на ВВЭР-440: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Г.В. Осокин; исполн.: О.И. Мелихов, А.В. Клинковский, С.В. Смирнов. — Электрогорск, 1998. — 78 с. — Инв. № 5.509.*

**Подготовка материалов по настройке системы пассивного залива при пуско-наладочных работах на основе данных по моделированию работы ГЕ-2 на стенде ИСБ-ВВЭР**

*Руководитель инженер М.П. Гашенко;  
исполнители: канд. техн. наук А.П. Прошутинский, инженер Е.В. Столяров,  
З.А. Лебедева*

Представлены результаты работы, целью которой являлось:

- профилирование расхода воды, подаваемой из системы гидроёмкостей второй ступени стенда ИСБ-ВВЭР в модель реактора перед выполнением эксперимента;
- проведение эксперимента, имитирующего течь теплоносителя 11% из опускного участка реактора и работу пассивных систем в условиях отказа активных систем САОЗ;
- сравнение расходных характеристик подачи воды из системы гидроёмкостей второй ступени, полученных до и после эксперимента и определение факторов, влияющих на расходную характеристику подачи воды в первый контур ИСБ-ВВЭР.

Выполнено: тарировка объёмов гидроёмкостей второй ступени, отладка средств измерения уровней в сосудах гидроёмкостей, реконструкция регулирующих клапанов системы профилирования расхода, настройка заданного профиля расхода охлаждающей воды в модель реактора стенда ИСБ-ВВЭР в «холодных» условиях, эксперимент с 11% течью теплоносителя из опускного участка модели реактора и подачей воды в 1-й контур из системы

гидроёмкостей. В эксперименте подача воды из системы гидроёмкостей по ступеням профилирования расхода проводилась при удовлетворительном соответствии с заданным профилированным расходом.

*Подготовка материалов по настройке системы пассивного залива при пуско-наладочных работах на основе данных по моделированию работы ГЕ-2 на стенде ИСБ-ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. М.П. Гашенко; исполн.: А.П. Прошутинский, Е.В. Столяров, З.А. Лебедева. — Электрогорск, 1998. — 68 с. — Инв. № 2.500.*

### **Обзор компьютерных кодов, предназначенных для анализа безопасности АЭС**

*Руководитель работы д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов;  
исполнители: канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов,  
канд. техн. наук Ю.Б. Воробьев*

Выполнен обзор современных теплогидравлических кодов улучшенной оценки RELAP5, ATHLET, BAGIRA, CATHARE. Подробно рассмотрены математические модели, лежащие в основе этих кодов. Данные коды сопоставимы между собой по уровню и качеству описания теплогидравлических процессов, а также степени их верифицированности и могут использоваться для анализа аварий на АЭС с ВВЭР. Рассмотрены также коды, предназначенные для исследования тяжелых аварий: MELCOR, MARCH, MAAP. Проведенный сопоставительный анализ кодов, предназначенных для моделирования тяжелых аварий, показал, что на настоящее время программа MELCOR является наиболее адекватным инструментом для анализа тяжелых аварий.

*Обзор компьютерных кодов, предназначенных для анализа безопасности АЭС: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. О.И. Мелихов; исполн.: В.И. Мелихов, Ю.Б. Воробьев. — Электрогорск, 1999. — 97 с. — Инв. № ЦМФМ.529.*

### **Претестовые расчеты экспериментов на стенде ЭНИЦ по исследованию эффективности барботажно-вакуумной системы локализации аварии на АЭС с ВВЭР-440/213**

*Руководитель работы д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов;  
исполнители: канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов, инженеры М.В. Давыдов,  
А.В. Соколин*

Выполнены претестовые расчеты с помощью кодов ATHLET и DRASYS по моделированию на экспериментальном стенде ЭНИЦ максимальной проектной аварии и аварии с гильотинным разрывом паропровода второго контура на АЭС с ВВЭР-440/В213. Показана возможность адекватного моделирования с помощью стенда ЭНИЦ всех ключевых процессов, протекающих в системе локализации аварий на АЭС с ВВЭР-440/В213. На основе результатов претест-анализа спланирована программа испытаний на экспериментальном стенде ЭНИЦ.

*Претестовые расчеты экспериментов на стенде ЭНИЦ по исследованию эффективности барботажно-вакуумной системы локализации аварии на АЭС с ВВЭР-440/213: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. О.И. Мелихов; исполн.: В.И. Мелихов, М.В. Давыдов, А.В. Соколин. — Электрогорск, 1999. — 46 с. — Инв. № 13.517.*

**Пост-тест расчет кодом RELAP5/MOD3.2 режима 11% течь из верхней камеры смешения модели реактора интегрального стенда ИСБ-ВВЭР с подачей охлаждающей воды САОЗ в горячий трубопровод аварийной петли**

*Руководитель работы д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов; исполнитель инженер И.В. Гашенко*

Выполнен пост-тест анализ кодом RELAP5/MOD3.2 стандартной проблемы (СП) В-5 совместного проекта № 6 «Валидация программных средств применительно к ВВЭР и РБМК» международных центров ядерной безопасности (МЦЯБ) России и США «11% течь теплоносителя из верхней камеры смешения с подачей охлаждающей воды САОЗ в горячий трубопровод аварийной петли», проведенной на стенде ИСБ-ВВЭР. Установлено в целом хорошее согласование между расчетными и экспериментальными значениями сравниваемых параметров аварийного режима, что свидетельствует об адекватном моделировании исследованного режима кодом RELAP5. В результате анализа теплогидравлических процессов, протекающих в отдельных элементах стенда, идентифицированы явления, присущие аварийному режиму СП МЦЯБ В-5 и дана оценка воспроизведения их кодом RELAP5/MOD3.2.

*Пост-тест расчет кодом RELAP5/MOD3.2 режима 11% течь из верхней камеры смешения модели реактора интегрального стенда ИСБ-ВВЭР с подачей охлаждающей воды САОЗ в горячий трубопровод аварийной петли: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. О.И. Мелихов; исполн. И.В. Гашенко. — Электрогорск, 1999. — 84 с. — Инв. № 2.519.*

**Система основных измерений стенда ПСБ-ВВЭР**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин; исполнители: инженеры Г.И. Дремин, И.А. Липатов, С.А. Галчанская, А.И. Антонова*

Описана система измерений стенда ПСБ-ВВЭР. Приведен перечень измеряемых величин, представлено подробное описание размещения датчиков на элементах оборудования стенда, дана характеристика первичных и вторичных преобразователей, образующих измерительные каналы, проанализированы инструментальные погрешности измерительных каналов.

*Система основных измерений стенда ПСБ-ВВЭР: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: Г.И. Дремин, И.А. Липатов, С.А. Галчанская, А.И. Антонова. — Электрогорск, 1999. — 92 с. — Инв. № 2.508.*

### **1% течь из гидрозатвора «холодного» трубопровода с отказом системы САОЗ высокого давления на стенде ПСБ-ВВЭР (эксперимент ГЗ-1.0-01)**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: инженеры Г.И. Дремин, И.А. Липатов, С.В. Зевалкин, С.А. Галчанская, А.И. Антонова, Ю.С. Горбунов*

Проведено исследование теплогидравлических процессов в модели первого контура реакторной установки ВВЭР-1000 при исходном событии – 1% течи теплоносителя из горизонтального участка гидрозатвора «холодного» трубопровода аварийной петли при отказе срабатывания системы САОЗ высокого давления. Полученные результаты показывают, что при данной последовательности событий потеря теплоносителя первого контура приводит к перегреву верхней части сборки имитаторов ТВЭЛОВ. Перегрев модели активной зоны наступает раньше, чем давление в первом контуре снижается до уставки активации гидроемкостей.

*1% течь из гидрозатвора «холодного» трубопровода с отказом системы САОЗ высокого давления на стенде ПСБ-ВВЭР (эксперимент ГЗ-1.0-01): отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: Г.И. Дремин, И.А. Липатов, С.В. Зевалкин и др. — Электрогорск, 1999. — 39 с. — Инв. № 2.530.*

### **Исследование аварийного режима с 1% течью из горизонтального участка «холодного» трубопровода с отказом срабатывания системы САОЗ (эксперимент ХТ-1.0-03)**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: инженеры С.В. Зевалкин, И.А. Липатов, Г.И. Дремин, С.А. Галчанская, А.И. Антонова, Ю.С. Горбунов*

Исследовалась авария, вызванная разгерметизацией первого контура (малая 1% течь из «холодного» трубопровода аварийной петли) с отказом САОЗ высокого давления (эксперимент ХТ-1.0-03) в модели 1-го контура реакторной установки ВВЭР-1000 – стенд ПСБ-ВВЭР. Показано, что при реализованной в эксперименте аварийной ситуации наступает перегрев.

*Исследование аварийного режима с 1% течью из горизонтального участка «холодного» трубопровода с отказом срабатывания системы САОЗ (эксперимент ХТ-1.0-03): отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: С.В. Зевалкин, И.А. Липатов, Г.И. Дремин и др. — Электрогорск, 1999. — 38 с. — Инв. № 2.533.*

### **Исследование аварийного режима с 4% течью из верхней камеры смещения и с отказом активной САОЗ высокого и низкого давления на стенде ПСБ-ВВЭР (эксперимент ВКС-4.0-02)**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: инженеры И.А. Липатов, Г.И. Дремин, С.В. Зевалкин, С.А. Галчанская, А.И. Антонова, Ю.С. Горбунов*

Цель работы – проведение эксперимента по исследованию теплогидравлических процессов в модели первого контура реакторной установки

ВВЭР-1000 (проект В-320) при исходном событии — 4% течи теплоносителя из выходной камеры смешения и полном отказе активной системы САОЗ как высокого, так и низкого давления. Кроме того, в эксперименте имитировался отказ одной из гидроемкостей САОЗ. Несмотря на отказы оборудования системы САОЗ, эффективности оставшихся гидроемкостей оказалось достаточно для надежного охлаждения имитаторов твэлов в течение первых 1980 секунд процесса. Последовавшая затем стабилизация давления в первом контуре привела к отсечению гидроемкостей (путем закрытия обратных клапанов) от первого контура и к началу разогрева активной зоны (на 2837-й секунде). Задержка в подключении гидроемкости САОЗ увеличила скорость снижения давления в первом контуре, вызвала кратковременное увеличение/снижение уровня в ОУ/ВКС соответственно и кратковременное снижение температуры в ОУ «холодных» трубопроводах.

*Исследование аварийного режима с 4% течью из верхней камеры смешения и с отказом активной САОЗ высокого и низкого давления на стенде ПСБ-ВВЭР (эксперимент ВКС-4.0-02): отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: И.А. Липатов, Г.И. Дремин, С.В. Зевалкин и др. — Электрогорск, 1999. — 48 с. — Инв. № 2.522.*

### **Проведение сравнительных коррозионных испытаний конструкционных материалов парогенератора ВВЭР-1000 при дозировке гидроксидов и боратов лития**

*Руководитель работы канд. техн. наук В.А. Гашенко;  
исполнители: инженер О.Н. Абакумова, канд. хим. наук Л.А. Галимова;  
от ВНИИАЭС: канд. техн. наук В.А. Мамет, инженер С.Ф. Ерпылева;  
от ОКБ «Гидропресс»: канд. техн. наук А.В. Селезнев, Л.А. Сирянина;  
инженеры О.П. Архипов, А.Н. Смирнов, В.С. Попадчук, С.И. Брыков,  
А.М. Пономарев, В.М. Волкова*

Проведены коррозионные испытания сталей 10ГН2МФА (конструкционный материал коллекторов и корпуса парогенератора ПГВ-1000) и 08Х18Н10Т (материал трубного пучка) в концентрированных щелочных растворах гидроксида лития LiOH (0,5 и 4,0%) и метабората лития LiBO<sub>2</sub> (10,0 и 4,0 %) при имитации вероятных условий упаривания котловой воды, содержащей щелочные добавки LiOH и LiBO<sub>2</sub>, в течение ~500 и ~1000 часов соответственно. Результаты испытаний указывают на появление коррозионных дефектов в виде язв, питтингов и трещин на напряженных образцах этих сталей в обоих щелочных растворах, поэтому непрерывная дозировка щелочных добавок LiOH и LiBO<sub>2</sub> для выполнения коррекционной обработки воды парогенераторов не рекомендуется. Использование щелочных добавок LiOH и LiBO<sub>2</sub> для коррекционной обработки продувочной воды возможно только на период появления «кислых» солей. Подчеркивается, что поскольку при проведении испытаний имели место «экстремальные» условия по концентрациям LiOH и LiBO<sub>2</sub>, целесообразно выполнение

ресурсных коррозионных испытаний с моделированием реальных условий рабочей среды ПГ.

*Проведение сравнительных коррозионных испытаний конструкционных материалов парогенератора ВВЭР-1000 при дозировке гидроксидов и боратов лития: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук.: В.А. Гашенко; исполн.: О.Н. Абакумова, Л.А. Галимова, В.А. Мамет и др. — Электрогорск, 1999. — 61 с. — Инв. № 4.535.*

### **Расчётное исследование динамики паровых взрывов в шахте реактора ВВЭР-1000 в тяжёлых авариях с расплавлением активной зоны**

*Исполнители: д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов, канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов, инженер Т.В. Урбан; от ОКБ «ГИДРОПРЕСС»: инженеры Г.А. Волков, С.Н. Краснов*

Представлены результаты выполненного с помощью разработанного в ЭНИЦ кода VAREX расчёта парового взрыва в шахте реактора ВВЭР-1000 и определены при этом нагрузки. Рассмотрены три варианта падения расплава: пролив в центре шахты и два боковых пролива. Во всех случаях процесс парового взрыва протекает схожим образом, наблюдаются только некоторые количественные различия. Отмечается, что процесс парового взрыва является ещё малоизученным, поэтому результаты, полученные в выполненной работе, следует рассматривать как предварительные, требующие дальнейшего анализа и уточнения. Изложено описание комплекса работ на будущее.

*Расчётное исследование динамики паровых взрывов в шахте реактора ВВЭР-1000 в тяжёлых авариях с расплавлением активной зоны: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; исполн.: О.И. Мелихов, В.И. Мелихов, Т.В. Урбан и др. — Электрогорск, 1999. — 106 с. — Инв. № 13.497.*

### **Оценка явления противотока применительно к условиям верхней камеры смешения стенда ПСБ ВВЭР с помощью кода RELAP5/MOD3.2**

*Руководитель работы инженер Э.Ю. Щепетильников; исполнитель инженер А.В. Капустин*

Объектом исследования является явление противоточного течения в верхней силовой решётке экспериментального стенда ПСБ ВВЭР при пассивном заливе верхней камеры водой из гидроёмкостей. Цель работы — установление отличий в результатах расчёта, полученных при использовании CCFL-корреляции Уолиса, CCFL корреляции Кутателадзе и без применения модели противоточного течения при помощи кода RELAP5/MOD3.2. Установлено совпадение результатов, получаемых при применении корреляции Уолиса, корреляции Кутателадзе и без применения модели противоточного течения. Расчётным путём установлено, что при условиях, соответствующих модели, вода, заливаемая из гидроёмкостей в верхнюю камеру, не проходит в необходимом количестве в обогреваемый участок.

*Оценка явления противотока применительно к условиям верхней камеры смешения стэнда ПСБ ВВЭР с помощью кода RELAP5/MOD3.2: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Э.Ю. Щепетильников; исполн. А.В. Капустин. — Электрогорск, 1999. — 42 с. — Инв. № 2.521.*

### **Разработка первой версии программного комплекса BOR3D для расчетов перемешивания потоков теплоносителя с различной концентрацией бора**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов; исполнители: д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов, канд. физ.-мат. наук С.Е. Якуш, д-р техн. наук Л.И. Зайчик*

В работе изложена математическая модель первой версии кода BOR3D, предназначенного для трехмерных расчетов процессов перемешивания потоков теплоносителя с различной концентрацией бора в реакторе ВВЭР-1000. Описана численная схема для интегрирования определяющих уравнений движения. Приведены результаты верификационных расчетов с использованием опытных данных, полученных на стенде ОКБ «Гидропресс».

Приведены результаты проведенных с использованием программного комплекса BOR3D расчеты течения теплоносителя и распространения пробки неборированной воды в проточном тракте модели реактора ВВЭР-1000 (масштаб 1:5). При этом диапазон используемых параметров (зависимость расхода теплоносителя от времени, объем пробки неборированной воды и т.п.), соответствовал данным экспериментов, проведенных в ОКБ «Гидропресс». Представлены полученные характеристики распространения объема неборированного теплоносителя в реакторе и временные характеристики процесса.

Отмечается, что полученные в расчетах картина течения, времена достижения неборированным теплоносителем входа в активную зону, время возникновения пониженных концентраций в реакторе, максимальные относительные концентрации на уровне эллиптического днища шахты в хорошем качественном соответствии с результатами экспериментов и расчетов, выполненных другими авторами. Вместе с тем, дальнейшее совершенствование программного кода и математической модели с необходимостью включает реализацию более совершенной модели турбулентности.

*Разработка первой версии программного комплекса BOR3D для расчетов перемешивания потоков теплоносителя с различной концентрацией бора: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Мелихов; исполн.: О.И. Мелихов, С.Е. Якуш, Л.И. Зайчик. — Электрогорск, 1999. — 67 с. — Инв. № 13.529.*

## **Экспериментальное обоснование проектных функций системы пассивного залива второй ступени ГЕ-2 на интегральном стенде ИСБ-ВВЭР**

*Руководитель работы канд. техн. наук М.П. Гашенко;  
исполнители: канд. физ.-мат. наук И.И. Шмаль, инженеры А.В. Басов,  
И.В. Гашенко, З.А. Лебедева, техник Г.А. Пуняева*

Экспериментально обоснованы проектные функции системы пассивного залива второй ступени ГЕ-2 РУ с ВВЭР-1000 в аварийном режиме с потерей теплоносителя. Впервые на стенде ИСБ ВВЭР выполнен эксперимент, имитирующий аварийный режим с большой течью теплоносителя (17%) из главного циркуляционного трубопровода в месте подключения к опускающему участку реактора и срабатывание штатных гидроемкостей (высокого давления) и гидроемкостей второй ступени (низкого давления) пассивной части САОЗ, подтвердивший возможность устойчивого повторного залива модели АЗ профилированным во времени расходом охлаждающей воды из гидроемкостей второй ступени пассивной части САОЗ. Претест расчеты выполнялись с помощью зарубежных кодов улучшенной оценки RELAP5/MOD3.2 и CATNARE-2.

*Экспериментальное обоснование проектных функций системы пассивного залива второй ступени ГЕ-2 на интегральном стенде ИСБ-ВВЭР: отчет о НИР/ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. М.П. Гашенко; исполн.: И.И. Шмаль, А.В. Басов, И.В. Гашенко и др. — Электрогорск, 2000. — 79 с. — Инв. № 2.548.*

## **Разработка первой версии программного комплекса BOR 3D для расчета перемешивания потоков теплоносителя с различной концентрацией бора**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов;  
исполнители: д-р техн. наук Л.И. Зайчик,  
канд. физ.-мат. наук С.Е. Якуш;  
от ОКБ «Гидропресс»: канд. техн. наук Ю.А. Безруков,  
инженеры С.А. Логвинов, В.Н. Ульяновский*

Работа посвящена созданию трехмерного компьютерного кода BOR 3D, позволяющего производить расчеты нестационарных течений в проточном тракте реактора и исследовать динамику развития аварийной ситуации при попадании пробки воды с низким содержанием бора из главного циркуляционного трубопровода в проточный тракт реактора и в активную зону, получать распределения концентрации бора во входном сечении активной зоны в зависимости от времени, продолжительность существования пониженных концентраций бора, минимальные и средние по сечению концентрации. С использованием программного комплекса BOR 3D проведены расчеты течения теплоносителя и распространения пробки неборированной воды в проточном тракте модели реактора ВВЭР-1000 (1:5). Диапазон используемых параметров (зависимость расхода теплоносителя от времени, объем

пробки неборированной воды и т.п) соответствовал данным экспериментов, проведенных ОКБ «Гидропресс». Получены характеристики распространения объема неборированного теплоносителя в реакторе, временные характеристики процесса.

*Разработка первой версии программного комплекса BOR 3D для расчета перемешивания потоков теплоносителя с различной концентрацией бора: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Мелихов; исполн.: Л.И. Зайчик, С.Е. Якуш, Ю.А. Безруков и др. — Электрогорск, 2000. — 60 с. — Инв. № 13.546.*

### **Разработка трехмерной программы для расчета теплогидравлики горизонтального парогенератора для ВВЭР-1500. Верификация программы на экспериментальных данных для ПГВ-1000**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов; исполнитель инженер Т.В. Урбан*

Разработана трехмерная программа STEG для расчета теплогидравлики горизонтального парогенератора. Проведена верификация программы STEG на результатах натурных испытаний, проводившихся на парогенераторе ПГВ-1000 5-го блока Нововоронежской АЭС. Полученная в расчетах картина течения пароводяной смеси в горизонтальном парогенераторе ПГВ-1000 качественно и количественно отражает гидродинамические процессы, наблюдавшиеся в эксперименте. Программа STEG предназначена для проведения оптимизационных расчетов с целью отработки конструкции горизонтального парогенератора перспективных ВВЭР.

*Разработка трехмерной программы для расчета теплогидравлики горизонтального парогенератора для ВВЭР-1500. Верификация программы на экспериментальных данных для ПГВ-1000: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Мелихов; исполн. Т.В. Урбан. — Электрогорск, 2000. — 59 с. — Инв. № 13.561.*

### **Разработка и испытание системы безинерционного измерения расхода пара с целью ее внедрения в схеме автоматического регулирования уровня воды в парогенераторах блоков ВВЭР-1000**

*Руководитель работы д-р техн. наук А.Г. Агеев; исполнитель канд. техн. наук Р.В. Васильева*

Разработана и испытана система прямого безинерционного измерения расхода пара в трубопроводе ПГ. Представленный алгоритм корректировки выходного сигнала датчика перепада давления позволяет вычислить расход генерируемого пара при изменении давления в ПГ при переходных режимах. Испытания разработанной ЭНИЦ и Балаковской АЭС системы безинерционного измерения расхода пара в ПГ, проведенные на блоке №3 Балаковской АЭС, показали, что данная измерительная система обеспечивает эксплуатационную надежность в условиях влажнопарового потока, безинерционность передачи сигнала от первичного датчика в измерительную систему.

*Разработка и испытание системы безинерционного измерения расхода пара с целью ее внедрения в схеме автоматического регулирования уровня воды в парогенераторах блоков ВВЭР-1000: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. А.Г. Агеев; исполн. Р.В. Васильева. — Электрогорск, 2000. — 27 с. — инв. № 12.579.*

### **Формирование требований к автоматизированной системе контроля и управления водно-химических процессов I и II контуров ВВЭР-1000**

*Руководитель проекта канд. техн. наук В.А. Гашенко (ЭНИЦ);  
руководитель работы д-р техн. наук В.Н. Воронов (МЭИ);  
исполнители: д-р техн. наук Э.К. Аракелян (МЭИ), канд. техн. наук В.А. Мамет, В.Ф. Тяпков (ВНИИАЭС), И.С. Никитина, П.Н. Назаренко (МЭИ), Р.Д. Филин, В.Г. Михалицин, А.А. Ефимов, Н.Я. Вилков (НИТИ), А.П. Титаренко (МЭИ), инженеры С.Р. Ерпылева, В.А. Юрманов, М.В. Федосеев (ВНИИАЭС), С.П. Горбатенко, Г.Д. Отченашев (Клининская АЭС), А.В. Ульянов (ЭНИЦ), И.Н. Гриднев (Конверс-Электроприбор), О.В. Егошина, С.А. Кольшишникова, М.П. Назаренко, Е.В. Паули, Д.С. Сметанин, И.А. Табаков, Е.В. Титаренко (МЭИ), В.Н. Матвеев, Ю.В. Крюков, П.П. Хархардин (Хартрон)*

В рамках работы проведено обследование I и II контуров АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и их вспомогательных систем — анализ нормативной, проектной и эксплуатационной документации в части технологических режимов работы и конструктивных особенностей оборудования и установок; сформированы исходные данные для формирования требований к СКУ ВХР; разработаны требования к СКУ ВХР I и II контуров АЭС с ВВЭР-1000, в том числе комплекс задач контроля, диагностики и управления для ВХР II контура.

Сбор необходимых информационных материалов, их анализ, обобщение и оформление выполнен специалистами ведущих российских организаций в области водных технологий АЭС - ВНИИАЭС, НИТИ, МЭИ, ЭНИЦ, Калининской АЭС, НПП «Конверс-Электроприбор» - полномочного представителя ОАО «Хартрон» (Украина).

*Формирование требований к автоматизированной системе контроля и управления водно-химических процессов I и II контуров ВВЭР-1000: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук.: В.А. Гашенко, В.Н. Воронов; исполн.: Э.К. Аракелян, В.А. Мамет, В.Ф. Тяпков и др. — Электрогорск, 2000. — 259 с. — Инв. № 11.568, 11.568п.*

### **Экспериментальное обоснование проектных функций системы пассивного залива второй ступени ГЕ-2 на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР**

*Руководитель работы канд. техн. наук М.П. Гашенко;  
исполнители: канд. физ.-мат. наук И.И. Шмаль, инженеры А.В. Басов, И.В. Гашенко, З.А. Лебедева, техник Г.А. Пуняева*

Представлены претест расчёты и результаты эксперимента, имитирующего аварийный режим с течью (17%) теплоносителя из главного циркуляционного трубопровода в месте подключения к опускному участку реактора

со срабатыванием штатных гидроёмкостей (высокого давления) и гидроёмкостей второй ступени (низкого давления) пассивной части САОЗ. Претест расчёты выполнялись с помощью зарубежных кодов улучшенной оценки RELAP5/MOD3.2 и CATHARE-2. Расчётное моделирование аварийного режима достаточно хорошо предсказало развитие теплогидравлических процессов в контуре стенда ПСБ-ВВЭР и влияние на них охлаждающей воды из штатных гидроёмкостей и гидроёмкостей второй ступени ГЕ-2 пассивной части САОЗ. Полученные результаты характеризуют быстропротекающий аварийный процесс с потерей теплоносителя в течь, в котором произошло ухудшение теплогидравлической обстановки в зоне имитаторов твэл, сопровождаемое разогревом стенки имитаторов твэл по всей высоте и сечению модели активной зоны. Последующий залив зоны имитаторов твэл охлаждающей водой из штатных гидроёмкостей (высокого давления) препятствовал перегреву имитаторов твэл, а поступление охлаждающей воды в опускной участок модели реактора из гидроёмкостей второй ступени (низкого давления) обеспечило устойчивый теплоотвод от сборки имитаторов твэл. Представлены результаты впервые выполненного на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР эксперимента с большой 17% течью теплоносителя из холодной части первого контура, который подтвердил возможность устойчивого повторного залива модели АЗ профилированным во времени расходом охлаждающей воды гидроёмкостей второй ступени пассивной части САОЗ. Результаты выполненного эксперимента могут быть использованы для обоснования проектных функций системы пассивного залива 2-й ступени реакторной установки с учетом особенностей конструкции и тепловых потерь стенда и системы ГЕ-2.

*Экспериментальное обоснование проектных функций системы пассивного залива второй ступени ГЕ-2 на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. М.П. Гашенко; исполн.: И.И. Шмаль, А.В. Басов, И.В. Гашенко, З.А. Лебедева, Г.А. Пуняева. — Электрогорск, 2000. — 79 с. — Инв. № 2.548.*

## **Обоснование схемы ГЕ-2 применительно к условиям стенда ПСБ ВВЭР**

*Руководитель работы д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов;  
исполнитель канд. техн. наук А.П. Прошутинский*

Описана схема пассивной подачи воды, разработанная для стенда ПСБ-ВВЭР с целью проверки технических решений, заложенных в систему гидроёмкостей второй ступени ГЕ-2 и оптимизации схемы включения этой системы при авариях с потерей теплоносителя в первом контуре РУ ВВЭР-1000. Уточнены условия моделирования системы ГЕ-2 для стенда ПСБ-ВВЭР. Изложены основные положения технического задания на проектирование системы ГЕ-2 стенда ПСБ-ВВЭР, на основании которых разработана конструкторская документация системы ГЕ-2 для стенда ПСБ-ВВЭР.

*Обоснование схемы ГЕ-2 применительно к условиям стенда ПСБ ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. О.И. Мелихов; исполн. А.П. Прошутинский. — Электрогорск, 2000. — 16 с. — Инв. № 2.549.*

### **Расчётное обоснование технологической схемы УИТ-ИК при исследовании МПА на стенде ИСБ ВВЭР**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: канд. техн. наук Е.И. Трубкин, инженер И.Е. Шалатонова*

Описано разработанное устройство имитации течи с инжектором-конденсатором (УИТ-ИК). Устройство позволяет имитировать МПА, связанную с разрывом трубопровода циркуляционной петли первого контура стенда ИСБ-ВВЭР. Расчётным путем установлено, что предлагаемые для схемы УИТ-ИК инжекторы обеспечивают термодинамические условия для измерения расходов смеси дроссельным методом. В работе впервые предлагается система запуска инжектора на нагрузку, основанная на свойствах критического истечения. УИТ-ИК рассчитано на следующие параметры:

- давление в первом контуре стенда ИСБ-ВВЭР — 16,0 МПа;
- температура теплоносителя — 320 °С;
- максимальный расход истекающего теплоносителя — 11,3 кг/с со стороны РУ и 6,1 кг/с со стороны ПГ.

*Расчётное обоснование технологической схемы УИТ-ИК при исследовании МПА на стенде ИСБ ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: Е.И. Трубкин, И.Е. Шалатонова. — Электрогорск, 2000. — 26 с. — Инв. № 2.547.*

### **Пост-тест расчёт режима — 1% течь из гидрозатвора «холодного» трубопровода полномасштабного стенда безопасности ПСБ-ВВЭР**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов;*

*исполнитель канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфёнов*

Представлены результаты пост-тестового моделирования теплогидравлическим кодом CATHARE 2/VERSION V1.3E эксперимента, выполненного на крупномасштабном интегральном стенде ПСБ-ВВЭР. Исходное событие — 1% течь теплоносителя из гидрозатвора «холодного» трубопровода аварийной петли при отказе срабатывания двух из трёх линий системы САОЗ высокого давления и аварийных питательных насосов. Расчёт выявил возможности и ограничения кода CATHARE 2/VERSION V1.3E в плане воспроизведения теплогидравлических явлений, важных для безопасности станции, в экспериментах, проводимых на стенде ПСБ ВВЭР.

*Пост-тест расчёт режима — 1% течь из гидрозатвора «холодного» трубопровода полномасштабного стенда безопасности ПСБ-ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Мелихов; исполн. Ю.В. Парфёнов. — Электрогорск, 2000. — 48 с. — Инв. № 13.558.*

### **Пост-тест анализ кодом КОРСАР эксперимента течь 1,4% из первого контура во второй контур на стенде ПСБ ВВЭР**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов;  
исполнитель канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфёнов*

Представлены результаты выполненного с помощью кода КОРСАР пост-тест анализа эксперимента «Течь 1,4% из первого контура во второй контур», проведенного на стенде ПСБ ВВЭР. Пост-тест анализ показал, что код КОРСАР хорошо воспроизводит важнейшие экспериментальные параметры, такие как давление первого и второго контура, весовые уровни в парогенераторах, температура поверхности имитаторов ТВЭЛ. Расчётное моделирование истечения теплоносителя показало достоверность экспериментальных результатов, полученных с помощью нестандартных измерений, установленных в линии течи стенда ПСБ-ВВЭР, и корректность модели критического истечения, принятой в коде КОРСАР.

*Пост-тест анализ кодом КОРСАР эксперимента течь 1,4% из первого контура во второй контур на стенде ПСБ ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Мелихов; исполн. Ю.В. Парфёнов. — Электрогорск, 2000. — 111 с. — Инв. № 13.610.*

### **Обоснование системы сепарации для горизонтального парогенератора ПГВ-1500**

*Исполнители: д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов, д-р техн. наук А.Г. Агеев, канд. техн. наук Р.В. Васильева*

Представлено обоснование сепарационной схемы для горизонтального парогенератора нового поколения установки ВВЭР-1500.

Выполнены расчеты гравитационной сепарации пара и анализ экспериментальных данных, полученных на полноразмерных моделях и натуральных парогенераторах, расчет системы отбора пара из ПГ одним патрубком, расчет необходимого числа насадок для ПГВ-1500.

Показано, что традиционная сепарационная схема с погруженным листом штатной конструкции и пароприемным щитом при принятых нагрузках зеркала испарения не обеспечивает требования по нормированному значению влажности пара  $\omega=0,2\%$ .

Рекомендуется использование в сепарационной схеме парогенератора ПГВ-1500 погруженного листа с насадками.

*Обоснование системы сепарации для горизонтального парогенератора ПГВ-1500: расчетно-пояснительная записка / ЭНИЦ ВНИИАЭС; исполн. О.И. Мелихов, А.Г. Агеев, Р.В. Васильева. — Электрогорск, 2000. — 66 с. (с прилож.). — Инв. № 2.542(а).*

## **Разработка представительного комплекса по химико-аналитическому обеспечению полигонных испытаний СКУ ВХР I и II контура ВВЭР-1000**

*Руководитель проекта канд. техн. наук В.А. Гашенко;*

*исполнители: канд. хим. наук Л.А. Галимова, инженеры А.В. Ульянов, А.Л. Тарасюк, С.А. Баклашов, В.А. Сафронов, О.В. Шатерникова*

Разработан представительный комплекс по химико-аналитическому обеспечению полигонных испытаний СКУ ВХР I и II контуров АЭС с ВВЭР-1000. Разработаны требования к оснащению лабораторий, выбраны приборы и оборудование, определен объем и методы химического контроля. Проведено обоснование методов и средств химического контроля для представительного комплекса СКУ ВХР. Подготовлена справка о состоянии химического контроля на АЭС «Темелин» (Чехия).

*Разработка представительного комплекса по химико-аналитическому обеспечению полигонных испытаний СКУ ВХР I и II контура ВВЭР-1000: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.А. Гашенко; исполн.: Л.А. Галимова, А.В. Ульянов, А.Л. Тарасюк и др. — Электрогорск, 2000. — 75 с. — Инв. № 11.571.*

## **Техническое решение на систему термической сушки внутренней поверхности труб конденсаторов К-33160 турбин блоков № 1–4 Балаковской АЭС**

*Исполнители: канд. техн. наук В.А. Николаев, Л.Я. Россихин; инженеры Е.П. Марков, А.И. Грошев*

Разработано техническое решение на систему термической сушки внутренней поверхности труб конденсаторов К-33160 турбин блоков № 1–4 Балаковской АЭС. Разработанное техническое решение направлено на подавление процесса коррозии путем воздействия на состав среды-снижение относительной влажности воздуха в водяном объеме конденсаторов. Выполнены расчеты и разработаны рекомендации по проектированию оборудования системы термической сушки применительно к конденсатору типа К-33160 энергоблоков 1000 МВт Балаковской АЭС. Применение такой системы, хотя и сопряжено с некоторыми энергетическими затратами, позволяет добиться консервации оборудования без применения химических реагентов и при минимальных затратах на обслуживание.

*Техническое решение на систему термической сушки внутренней поверхности труб конденсаторов К-33160 турбин блоков № 1-4 Балаковской АЭС: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; исполн.: В.А. Николаев, Л.Я. Россихин, Е.П. Марков, А.И. Грошев. — Электрогорск, 2000. — 25 с. — Инв. №198/00.*

## Работы применительно к РБМК

### Описание интегрального стенда безопасности РБМК (ИСБ РБМК)

*Руководитель темы д-р техн. наук Б.И. Нигматулин;*

*руководитель работы канд. техн. наук А.Р. Амиров;*

*исполнители: инженер Е.В. Меркулов, канд. техн. наук А.П. Прошутинский, инженер А.В. Выхнов*

Представлено техническое описание интегрального стенда безопасности ИСБ РБМК как средства для моделирования широкого класса аварийных и переходных режимов применительно к реакторам типа РБМК с целью тестирования существующих и перспективных расчётных кодов и изучения сложных теплофизических процессов, сопровождающих аварийные и переходные режимы в КМПЦ РБМК.

Отмечается, что стенд представляет собой полупромышленную установку – полномасштабную (по высотным отметкам) модель контура МПЦ РБМК и включает два 7-ми стержневых электрообогреваемых канала, объединённых по ходу движения теплоносителя через НВК и ПВК моделью барабан-сепаратора и РГК стенда.

Основное оборудование стенда моделирует в объёмно-мощностном масштабе оборудование РБМК-1000.

*Описание интегрального стенда безопасности РБМК (ИСБ РБМК): отчёт о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС; рук.: Б.И. Нигматулин, А.Р. Амиров; исполн.: Е.В. Меркулов, А.П. Прошутинский, А.В. Выхнов. — Электрогорск, 1992. — 198 с. — Инв. № 3.40.*

### Экспериментальный стенд для исследования поведения технологических каналов реактора РБМК в экстремальных условиях (на макетах)

*Руководитель работы канд. техн. наук В.А. Гашенко;*

*исполнители: инженеры О.Н. Абакумова, Г.С. Полякова, Н.М. Александрова, от ВНИИАЭС: д-р техн. наук А.Г. Иолтуховский, инженер С.В. Гашенко*

Представлен сконструированный и созданный в ЭНИС экспериментальный стенд для изучения поведения укороченных макетов ТК реакторов РБМК в аварийных режимах (с нарушением теплосъёма). Проверка работоспособности всех систем стенда при наладочных пусках показала правильность и целесообразность принятых конструктивных и технологических решений. Технические возможности стенда позволяют определять предельно допустимые температуры нагрева технологического канала, изучать условия, при которых дальнейшая эксплуатация канала невозможна, установить температурные границы разрушения каналов, исследовать влияние перегрева (локального) трубы технологического канала на его эксплуатационную надёжность.

*Экспериментальный стенд для исследования поведения технологических каналов реактора РБМК в экстремальных условиях (на макетах): отчёт о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС; рук. В.А. Гашенко; исполн.: О.Н. Абакумова, Г.С. Полякова,*

*Н.М. Александрова, А.Г. Иолтуховский, С.В. Гашенко. — Электрогорск, 1992. — 19 с. — Инв. № 4.398.*

### **Разработка матрицы верификации системных теплогидравлических кодов РБМК**

*Руководитель темы д-р техн. наук Б.И. Нигматулин;  
исполнитель канд. техн. наук Л.К. Тихоненко*

Отмечается, что необходимость создания верифицированной модели РБМК признана на международном уровне. В перечне наиболее важных рекомендаций рабочих групп международного проекта «Безопасность проектных решений и эксплуатации АЭС с реактором РБМК» включён пункт «Провести верификацию и валидацию нестационарных теплогидравлических и нейтронных кодов на экспериментальных данных и в приемлемых случаях на других кодах». Разработана матрица верификации системных теплогидравлических кодов РБМК. Матрица является первым документом такого рода, предложенным на обсуждение специалистов в качестве концептуальной версии.

*Разработка матрицы верификации системных теплогидравлических кодов РБМК: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Б.И. Нигматулин; исполн. Л.К. Тихоненко. — Электрогорск, 1994. — 106 с. — инв. № 2.422.*

### **Расчётно-экспериментальное исследование макетов ТК при авариях с потерей теплоносителя**

*Руководитель канд. техн. наук В.А. Гашенко;  
исполнители: инженеры О.Н. Абакумова, Г.С. Полякова, С.В. Гашенко*

На специальном стенде проведён эксперимент, предусматривающий быстрый (~12 К/с) разогрев путём прямого пропускания переменного тока частично заполненного кипящей водой при давлении 7,5 МПа макета ТК (длиной ~ 1,6 м) от 300 до 600 °С с дальнейшей выдержкой при этой температуре до разрыва ТК. Получены данные об изменении температурного состояния макета ТК в различных сечениях и его деформационном поведении в сечении, находящемся в зоне максимального радиального деформирования — от начала разогрева до разрыва стенки.

*Расчётно-экспериментальное исследование макетов ТК при авариях с потерей теплоносителя: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.А. Гашенко; исполн.: О.Н. Абакумова, Г.С. Полякова, С.В. Гашенко. — Электрогорск, 1994. — 23 с. — Инв. № 4.426.*

### **Расчетное исследование устойчивости течения двухфазного теплоносителя в параллельных каналах реакторов типа РБМК**

*Б.И. Нигматулин, В.Н. Блинков, О.И. Мелихов, П.Г. Гакал*

Рассмотрены результаты численного исследования в рамках подхода, предполагающего замену системы параллельных каналов одним каналом с граничными условиями, характерными для параллельного соединения — по-

стоянство перепада давления на канале в процессе развития неустойчивости применительно к неустойчивым режимам течения кипящего теплоносителя в параллельных обогреваемых каналах. Проведено сравнение расчетов и экспериментов ЭНИЦ по границам устойчивости и осциллограммам расхода. Детально проанализирована природа автоколебаний. Сравнительный анализ устойчивости течения кипящего теплоносителя в параллельных технологических каналах реакторов РБМК-1000 и РБМК-1500 показал, что ограничения на режимные параметры не идентичны для ТК РБМК-1000 и РБМК-1500 с точки зрения недопущения развития термодинамической неустойчивости или кризиса теплоотдачи. При различных раскрытиях ЗРК и при учете парового эффекта реактивности следует ожидать количественного изменения полученных в данной работе результатов. Делается заключение, что в силу своей важности для обеспечения безопасности энергоблоков с реакторами типа РБМК проблема определения допустимого диапазона эксплуатационных параметров требует комплексного расчетно-теоретического и экспериментального исследования.

*Нигматулин Б.И., Блинков В.Н., Мелихов О.И., Гакал П.Г. Расчетное исследование устойчивости течения двухфазного теплоносителя в параллельных каналах реакторов типа РБМК. — Электрогорск, 1994. — 48 с. — (Препринт / ЭНИЦ ВНИИАЭС; №Л15-01/1994.06).*

### **Испытания макета технологического канала реакторов типа РБМК в условиях аварийного разогрева**

*Руководитель темы канд. техн. наук В.А. Гашенко;*

*исполнители: инженеры О.Н. Абакумова, Г.С. Полякова, З.А. Лебедева*

На специальном стенде проведено экспериментальное исследование поведения макета трубы технологического канала (ТК) РБМК под действием внутреннего избыточного давления (7,5 МПа) (азот) и в условиях непрерывного быстрого (до 12 °С/с) разогрева от  $T_{нач.} = 350$  °С — моделирование аварии с внезапным прекращением циркуляции теплоносителя через канал без срабатывания аварийной защиты до разрыва ТК. До проведения этих экспериментов данных по аварийному разогреву штатных труб ТК при значительных скоростях разогрева не имелось. Полученные в результате экспериментальные данные о поведении макета ТК в указанных выше условиях достаточно хорошо согласуются с результатами, полученными ранее на экспериментальных стендах НИКИЭТ и АЕСЛ.

*Испытания макета технологического канала реакторов типа РБМК в условиях аварийного разогрева: протокол / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.А. Гашенко; исполн.: О.Н. Абакумова, Г.С. Полякова, З.А. Лебедева. — Электрогорск, 1995. — 15 с. — Инв. № 184/95.*

## **Постановка, исходные данные и решение задачи верификации расчётных кодов для исследования проектных аварий в канальных реакторах типа РБМК**

*Руководитель темы д-р техн. наук Б.И. Нигматулин;*

*исполнители: д-р техн. наук В.Н. Блинков, инженеры Н.А. Брус, П.Г. Гакал, Н.И. Иваненко*

Работа посвящена постановке и решению первой задачи по верификации системных кодов для исследования проектных аварий в канальных реакторах типа РБМК. В качестве объекта верификации выбрана программа ATHLET. Первая верификационная задача построена на основе комплекса экспериментов по исследованию неустойчивости течения кипящего теплоносителя в параллельных обогреваемых каналах, выполненного на теплогидравлическом стенде 108 ЭНИЦ. Представлена информация, необходимая для выполнения претест-расчётов, экспериментальные данные для сравнения и проведения претест-расчётов, краткое описание системного кода ATHLET и основные результаты решения первой верификационной задачи (претест-расчёты, сопоставление результатов претест-расчётов с экспериментом, посттест-расчёты и анализ чувствительности, выводы о способности кода моделировать данное явление). По результатам решения верификационной задачи сделано заключение о соответствии расчётных результатов, полученных с помощью системного кода ATHLET, экспериментальным данным по явлению термодинамической неустойчивости кипящего теплоносителя в параллельных технологических каналах.

*Постановка, исходные данные и решение задачи верификации расчётных кодов для исследования проектных аварий в канальных реакторах типа РБМК: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Б.И. Нигматулин; исполн.: В.Н. Блинков, Н.А. Брус, П.Г. Гакал, Н.И. Иваненко. — Электрогорск, 1995. — 68 с. — Инв. № 15.437.*

## **Внедрение нейтрально-кислородного водного режима на Курской АЭС**

*Руководитель темы канд. техн. наук В.А. Гашенко;*

*исполнители: от ЭНИЦ: канд. техн. наук В.А. Кольчугин, И.С. Дубровский (ЭНИН), инженеры О.Н. Абакумова, Н.И. Алаев, канд. хим. наук Л.А. Галимова; от НИКИЭТ — канд. техн. наук А.А. Носков, В.Н. Белоус, от ВНИИАЭС: инженеры Г.А. Андропова, В.А. Юрманов; от Курской АЭС: инженеры О.В. Яцко, В.Н. Кожин, В.В. Сидоров, В.В. Волков, А.Н. Холодов*

Выполнено опытно-промышленное опробование нейтрально-кислородного водного режима (НКВР) с дозированием газообразного кислорода в конденсатные тракты турбоустановок ТГ 5 и ТГ 6 третьего энергоблока Курской АЭС (1-й этап). Получены результаты обработки данных химического и радиохимического контроля качества теплоносителя основного технологического контура третьего энергоблока АЭС, данные экспозиционной мощности дозы  $\gamma$ -излучения в реперных штатных точках и данные о по-

вреждаемости ТВС как в течение начального этапа опытно-промышленного дозирования кислорода в турбинный конденсат (с 26.10.95 г. по 25.04.96 г.), так и в предшествующий дозированию кислорода период эксплуатации — при ведении нейтрального бескоррекционного водно-химического режима. Обоснованы рекомендации по организации дополнительного контроля радиационной обстановки в помещениях оборудования КМПЦ. Отмечено, что в результате ввода кислорода в конденсатные тракты на внутренней поверхности баков деаэраторов образовалась защитная тёмно-серая оксидная плёнка и коррозионное состояние этих поверхностей оценивается как хорошее; заметного изменения радиационной обстановки не выявлено.

*Внедрение нейтрально-кислородного водного режима на Курской АЭС: отчет о НИР/ЭНИЦ ВНИИАЭС, Курская АЭС; рук. В.А. Гашенко; исполн.: В.А. Кольчугин, И.С. Дубровский, О.Н. Абакумова и др. — Электрогорск, 1996. — 84 с. — Инв. № 4.455.*

### **Экспериментальное исследование моделей канальных труб РБМК при авариях с потерей теплоносителя**

*Руководитель темы канд. техн. наук В.А. Гашенко;  
исполнители: инженеры О.Н. Абакумова, Г.С. Полякова;  
от НИКИЭТ инженер В.Н. Филинов*

Целью исследования является экспериментальное изучение поведения моделей канальных труб реактора РБМК в условиях, имитирующий аварийный разогрев канала при наличии внутреннего избыточного давления.

Представлены результаты двух проверенных на стенде К-6 ЭНИЦ-ВНИИАЭС опытов с образцами натурной трубы ТК РБМК (макет ТК) с целью определения характеристик деформирования и разрыва трубы ТК в условиях аварийного разогрева:

- в первом опыте после разогрева трубы со средней скоростью  $8,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до температуры  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  температурный режим трубы практически не менялся в течение  $\sim 120$  секунд до момента разрыва трубы;
- во втором опыте труба непрерывно разогревалась со средней скоростью  $11,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , разрыв произошел на 36-й секунде при температуре  $775\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Измерены разрывные (максимальные) деформации труб, частично зарегистрирован процесс деформирования, так как сечение размещения датчиков деформации не совпало с сечением максимальной деформации трубы.

Установлено, что разрывная деформация зависит не только от температуры, но и от скорости разогрева трубы. Отмечается, что сопоставление полученных на стенде К-6 результатов по разрывным значениям температуры и деформации с известными данными (НИКИЭТ, АЕСЛ) показало хорошее согласование данных.

Отмечается также, что:

- результатом проведения экспериментального исследования деформирования и разрушения отрезков штатных труб ТК РБМК и обработки экспериментальных данных является получение общего представления о характере процесса деформирования и разрушения трубы ТК, а также получение критериев разрушения труб в виде предельных зависимостей, связывающих между собой температуру при разрыве трубы, давление в канале при разрыве и максимальную относительную деформацию в месте разрыва трубы ТК;
- полученные результаты обеспечивают возможность внесения дополнительной информации в матрицу верификации вычислительных кодов, используемых при расчетном анализе аварийных процессов в активной зоне реактора РБМК;
- для получения представительных систематизированных данных следует продолжить экспериментальное исследование, в том числе на образцах ТК с графитовыми блоками, которые заметно влияют как на температурный режим трубы в процессе разогрева, так и на достижимые максимальные деформации трубы.

*Экспериментальное исследование моделей канальных труб РБМК при авариях с потерей теплоносителя: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.А. Гашенко; исполн.: О.Н. Абакумова, Г.С. Полякова, В.Н. Филинов. — Электрогорск, 1996. — 36 с. — Инв. № 4.458.*

### **Концепция, задачи исследований и принципиальная технологическая схема ПСБ РБМК**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.Н. Блинков;*

*исполнители: канд. техн. наук А.Р. Амиров;*

*от НИКИЭТ: инженер В.С. Башкин, инженер А.И. Ионов,*

*д-р техн. наук О.Ю. Новосельский, инженер Л.Н. Подлазов,*

*д-р техн. наук В.Н. Смолин, инженер В.П. Шишов, А.А. Роменков,*

*А.М. Николаев, канд. техн. наук А.И. Алексеев, О.А. Ярмоленко*

Целью работы является формулирование концепции, задач исследований и разработка принципиальной технологической схемы полномасштабного стенда безопасности (ПСБ) РБМК, предназначенного для исследования общеконтурных и канальных теплогидравлических процессов при отказах оборудования или разрывах трубопроводов. Полномасштабность стенда заключена в сохранении натуральных высотных отметок расположения оборудования, длины и сечений нижних водяных и пароводяных коммуникаций, геометрии каналов и параметров теплоносителя.

В работе содержатся сведения по компоновке, составу тепломеханического оборудования и основным теплотехническим параметрам, необходимые для разработки ТЗ на проектирование стенда.

*Концепция, задачи исследований и принципиальная технологическая схема ПСБ РБМК: отчет о НИР/ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.Н. Блинков; исполн.: А.Р. Амиров, В.С. Башкин, А.И. Ионов и др. — Электрогорск, 1996. — 27 с. — Инв. № 3.467.*

## **Верификация компьютерного кода для численного моделирования поведения трубы ТК в условиях высокотемпературной ползучести и разрушения с учётом взаимодействия трубы с графитом. Разработка и обоснование программы исследований множественного разрыва ТК на стенде ТКР**

*Руководитель темы канд. техн. наук В.Д. Локтионов;  
исполнитель инженер Н.И. Ярошенко*

Настоящий отчёт посвящён начальному этапу верификации компьютерного кода ASHTER-ТК, предназначенного для моделирования поведения трубы топливного канала реактора РБМК в условиях её высокотемпературной ползучести и разрушения. Данные компьютерный код является версией кода ASHTER-VVR, который успешно применяется для моделирования ползучести и разрушения корпуса реактора ВВЭР при тяжёлой аварии. Представлены результаты проведённого сравнения экспериментальных результатов по растяжению трубчатых образцов, изготовленных из материала Zircaloy-4, в условиях ползучести, с результатами численного моделирования с помощью кода ASHTER-ТК, которое показало хорошую корреляцию между расчётными и экспериментальными значениями. Представлены результаты по моделированию ползучести и разрушения одиночной трубы топливного канала реактора CANDU, полученные канадскими исследователями с помощью данного компьютерного кода.

Отмечается, что проведённый начальный этап верификации расчётного компьютерного кода ASHTER-ТК показал его работоспособность и пригодность для моделирования трубы топливного канала РБМК в условиях, сопровождающихся высокотемпературной ползучестью и разрушением ТК.

Отмечается также потребность в проведении дополнительных материаловедческих исследований свойств циркониевых сплавов с целью уточнения характеристик их ползучести.

*Верификация компьютерного кода для численного моделирования поведения трубы ТК в условиях высокотемпературной ползучести и разрушения с учётом взаимодействия трубы с графитом. Разработка и обоснование программы исследований множественного разрыва ТК на стенде ТКР: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.Д. Локтионов; исполн. Н.И. Ярошенко. — Электрогорск, 1997. — 27 с. — Инв. № 6.486.*

## **Изучение и анализ результатов стендовых испытаний и разработка технологической схемы химической обработки для энергоблоков АЭС**

*Руководитель работы инженер А.Ф. Абдуллаев;  
исполнители: канд. техн. наук Н.В. Иванова, инженер О.В. Шатерникова*

Получены данные, необходимые для разработки технологии горячей водно-кислородной обработки поверхностей из углеродистой стали в условиях работы АЭС, в частности, показана необходимость предварительной пассивации участков КПП энергоблока АЭС при пуске в связи с повышен-

ным выносом с теплообменных поверхностей эрозионно- и коррозионно-активных примесей в пусковом режиме. Приведены результаты стендовых технологических экспериментов (стенд МК-1 ЭНИЦ) по исследованию влияния режима работы блока на концентрацию в воде соединений железа и органических веществ в мелкодисперсной форме. Представлены результаты стендовых исследований поверхностей из углеродистых сталей в условиях, приближенных к рекомендуемым при проведении горячей водно-кислородной обработки КПП блока АЭС. Представлена технологическая схема мероприятий по проведению горячей водно-кислородной обработки КПП энергоблока Курской АЭС с реактором РБМК.

*Изучение и анализ результатов стендовых испытаний и разработка технологической схемы химической обработки для энергоблоков АЭС: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. А.Ф. Абдуллаев; исполн.: Н.В. Иванова, О.В. Шатерникова. — Электрогорск, 1997. — 39 с. — Инв. № 8.491.*

### **Расчётно-экспериментальное моделирование поведения и разрушения одиночной трубы ТК РБМК. Верификация компьютерного кода ASHTER-ТК для моделирования поведения и разрушения ТК РБМК в аварийных условиях**

*Руководитель канд. техн. наук В.А. Гашенко;  
исполнители: канд. техн. наук В.Д. Локтионов, инженеры О.Н. Абакумова,  
Н.Я. Ярошенко, Н.М. Меркулова*

Представлены результаты очередного этапа верификации кода ASHTER-ТК, предназначенного для моделирования поведения трубы топливного канала ректора РБМК в условиях её температурной ползучести и разрушения. В качестве верификационного теста рассматривалась ползучесть одиночной трубы ТК РБМК, нагруженной внутренним давлением 0,9 МПа и находящейся в режиме выдержки при температуре 1000 К до момента её разрушения. Исследовался режим сверхпластического поведения материала трубы. Экспериментальное исследование проводилось на установке К-6, оснащённой соответствующей измерительной и регистрирующей аппаратурой. Проведены пре-тестовые расчёты по моделированию трёх сценариев эксперимента на К-6, в которых оценены время разрушения трубы ТК и ожидаемая её деформация. Показано влияние температурного профиля вдоль трубы на время разрушения и характер её деформирования. Проведён пост-тестовый численный анализ поведения макета трубы и произведено сравнение с экспериментальными результатами. Полученные результаты могут быть использованы для целей верификации расчётных программ и кодов по моделированию поведения и разрушения элементов ядерно-энергетических установок в аварийных условиях, а также использованы для уточнения имеющихся критериев разрушения ТК.

*Расчётно-экспериментальное моделирование поведения и разрушения одиночной трубы ТК РБМК. Верификация компьютерного кода ASHTER-ТК для модели-*

*рования поведения и разрушения ТК РБМК в аварийных условиях: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.А. Гашенко; исполн.: В.Д. Локтионов, О.Н. Абакумова, Н.Я. Ярошенко, Н.М. Меркулова. — Электрогорск, 1998. — 59 с. — Инв. № 4.503.*

### **Оценочный расчёт элементарной ячейки РБМК при изгибе под действием внешней нагрузки в условиях аварии с разрывом канальной трубы**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева; научный руководитель работы д-р физ.-мат. наук Р.В. Гольдштейн; исполнители: инженеры А.С. Сергеев, С.В. Тимкин*

В работе представлены следующие полученные результаты:

- обзор сценариев аварий, которые могут привести к разрыву одной или нескольких канальных труб;
- расчёты поведения канальной трубы при изгибе от воздействия внешних нагрузок;
- аналитические зависимости граничных условий для определения формы упругой линии балки, соответствующей участку канальной трубы в пределах активной зоны, от величины и положения внешней нагрузки;
- получена упрощенная зависимость реакции графитовой колонны от величины и положения внешней нагрузки.

При рассмотрении представленных подзадач выяснилось, что в расчётах поведения элементарной ячейки при воздействии на неё внешней нагрузки, перпендикулярной продольной оси ТК, нельзя пренебрегать участием графитовой колонны в восприятии этой нагрузки. Доля усилия, воспринимаемого графитовой колонной, составляет 8,9–9,7% при максимальном прогибе 0,1 м, 31–33% при максимальном прогибе 0,05 м (внешняя сила воздействует на седьмой снизу графитовый блок, приведены максимальное и минимальное значения для различных видов графитовых колонн).

*Оценочный расчёт элементарной ячейки РБМК при изгибе под действием внешней нагрузки в условиях аварии с разрывом канальной трубы: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук.: Н.Ю. Медведева, Р.В. Гольдштейн; исполн.: А.С. Сергеев, С.В. Тимкин. — Электрогорск, 1998. — 30 с. — Инв. № 6.506.*

### **Верификация теплогидравлических кодов на основе стандартных проблем безопасности РБМК**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.Н. Блинков; исполнители: канд. техн. наук Н.А. Брус, д-р техн. наук А.А. Крамеров, В.Н. Смолин, д-р физ.-мат. наук Я.Д. Ходжаев, инженер О.Е. Юсупов*

Объектом исследования являются теплогидравлические процессы и явления, имеющие место в аварийных и переходных режимах эксплуатации РБМК. Цель работы: определить наиболее важные для безопасности РБМК теплогидравлические процессы/явления; проанализировать имеющиеся в

России экспериментальные данные по этим процессам и явлениям; определить перечень экспериментов, которые предлагается использовать для постановки стандартных проблем; выбрать две стандартные проблемы. подготовить по ним исходные данные; провести верификацию по этим явлениям двух наиболее распространённых теплогидравлических кодов. В работе представлены данные по двум стандартным проблемам: «Аварийное расхолаживание зоны тепловыделения реактора РБМК в режиме естественной циркуляции» и «Исследование теплогидравлической устойчивости в КМПЦ РБМК на стенде 108 (ЭНИЦ)». По предложенной стандартной проблеме «Аварийное расхолаживание зоны тепловыделения реактора РБМК в режиме естественной циркуляции» были выполнены верификационные расчёты кодами RELAP5/MOD 3.2 и ATHLET MOD 1.1. По предложенной стандартной проблеме «Исследование теплогидравлической устойчивости в КМПЦ РБМК на стенде 108 (ЭНИЦ)» были выполнены верификационные расчёты кодом RELAP5/MOD 3.2. Подготовленный и представленный перечень стандартных проблем, по которым предлагается верифицировать теплогидравлические коды РБМК и отработанные по двум стандартным проблемам, можно использовать для верификации отечественных теплогидравлических кодов.

*Верификация теплогидравлических кодов на основе стандартных проблем безопасности РБМК: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.Н. Блинков; исполн.: Н.А. Брус, А.Я. Крамеров, В.Н. Смолин, Я.Д. Ходжаев, О.Е. Юсупов. — Электрогорск, 1998. — 157 с. — Инв. № 3.513.*

### **Обоснование модернизации и применения стенда ТКР для изучения явления множественного разрыва технологических каналов РБМК**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева; исполнители: инженеры С.В. Калашикова, В.И. Белов*

Проведен анализ возможности применения созданного в конце 80-х годов специального оборудования крупномасштабной установки для моделирования аварийных процессов с разрушением канальной трубы на создаваемом крупномасштабном стенде ТКР, рабочий участок которого представляет собой натурный фрагмент графитовой кладки реактора РБМК-1000. Выявлены структурные элементы установки, модернизация которых позволит воспроизводить на стенде ТКР условия развития аварии с разрушением ТК, соответствующие современным представлениям о характере термомеханических и теплогидравлических процессов, сопровождающих аварийную ситуацию в РБМК при разрыве одиночного ТК.

*Обоснование модернизации и применения стенда ТКР для изучения явления множественного разрыва технологических каналов РБМК: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: С.В. Калашикова, В.И. Белов. — Электрогорск, 1998. — 30 с. — Инв. № 6.505.*

**Экспериментальная оценка совокупного влияния температуры и начальной концентрации кислорода на стойкость против коррозионного растрескивания под напряжением углеродистой стали применительно к трубопроводам конденсатно-питательного тракта АЭС с РБМК-1000 (автоклавные испытания)**

*Руководитель темы канд. техн. наук В.А. Гашенко;  
руководитель работы канд. техн. наук И.Л. Харина;  
исполнитель от ЦНИИТМАШ инженер Л.П. Бекетова*

Проведены эксперименты по оценке стойкости против коррозионного растрескивания (КР) под напряжением углеродистой стали в высокотемпературной воде с варьируемой концентрацией кислорода. Полученные в работе результаты по исследованию склонности к КР под напряжением в условиях нагружения с малой скоростью деформации ( $\epsilon=(2,8-1,4)\cdot 10^{-7}\text{с}^{-1}$ ) в воде высоких параметров (175–200 °С) стали 20, а также полученные ранее (ЦНИИТМАШ) данные о стойкости против замедленного деформационного-коррозионного растрескивания (ЗДКР) углеродистых и низколегированных сталей в высокотемпературной воде, содержащей растворённый кислород, позволили сделать заключение о том, что для аргументированного обоснования НКВР необходимо учитывать влияние концентрации кислорода в воде на стойкость конструкционных сталей технологических трубопроводов против КР под напряжением — особенно для наиболее уязвимых с точки зрения характера и уровня напряжённо-деформированного состояния элементов конструкций (сварных швов).

*Экспериментальная оценка совокупного влияния температуры и начальной концентрации кислорода на стойкость против коррозионного растрескивания под напряжением углеродистой стали применительно к трубопроводам конденсатно-питательного тракта АЭС с РБМК-1000 (автоклавные испытания): отчет о НИР / ЦНИИТМАШ, ЭНИЦ; рук.: В.А. Гашенко, И.Л. Харина; исполн. Л.П. Бекетова. — М., 1998. — 36 с. — Инв. № 539 (ЭНИЦ).*

**Расчётно-аналитическое обоснование экспериментов на стенде ПСБ-РБМК**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.Н. Блинков;  
исполнители: канд. техн. наук Н.А. Брус, д-р техн. наук А.Я. Крамеров,  
инженеры О.Е. Юсупов, Е.А. Подсобляева*

Разработана программа экспериментов для полномасштабного стенда безопасности РБМК (ПСБ-РБМК); численное моделирование и последующий анализ предложенных экспериментов; выработка дополнительных требований к элементам оборудования и системам измерения стенда. Определены режимы, процессы и явления, по которым необходимы эксперименты на стенде ПСБ-РБМК. Разработаны сценарии первоочередных экспериментов на стенде ПСБ-РБМК. По предложенным сценариям выполнены претестовые расчёты кодом RELAP5/MOD3.2. По результатам

проведенного анализа выработаны дополнительные требования к средствам измерения и обработки экспериментальных данных.

*Расчётно-аналитическое обоснование экспериментов на стенде ПСБ-РБМК: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.Н. Блинков; исполн.: Н.А. Брус, А.Я. Крамеров, О.Е. Юсупов, Е.А. Подсобляева. — Электрогорск, 1999. — 116 с. — Инв. № 3.551.*

### **Проблемы математического и физического моделирования при экспериментальном исследовании явления множественного разрыва канальных труб на крупномасштабном стенде ТКР**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева; исполнители: инженеры С.В. Тимкин, С.В. Родионов, С.В. Калашикова, А.С. Сергеев*

Аналитически исследованы проблемы реализации наихудших сценариев развития аварийного процесса с разрушением ТК на крупномасштабном стенде ТКР. Рассмотрены вопросы модернизации структурных элементов стенда ТКР в соответствии с современными представлениями о характере термомеханических и теплогидравлических процессов, сопровождающих аварийную ситуацию в РБМК, вызванную разрывом одиночного ТК. Определены основные направления модернизации стенда ТКР. Выбран вариант конструкции защитного кожуха МРК. Разработана новая схема системы локализации аварии для стенда ТКР. Предложен способ термомеханического разрушения центрального канала МРК с использованием внутреннего нагревателя. Разработаны технические требования к конструкции нагревателя. Проведен предварительный анализ и схематизация процессов и явлений, сопровождающих одиночный разрыв ТК. Определены основные типы модельных задач. Построена модель для расчёта изгиба графитовой колонны с технологическим каналом и оценки жёсткости группы графитовых колонн.

*Проблемы математического и физического моделирования при экспериментальном исследовании явления множественного разрыва канальных труб на крупномасштабном стенде ТКР: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: С.В. Тимкин, С.В. Родионов, С.В. Калашикова, А.С. Сергеев. — Электрогорск, 1999. — 96 с. — Инв. № 6.518.*

### **Стенд ТКР как основное экспериментальное средство изучения множественного разрушения технологических каналов РБМК. Модификация и переоснащение стенда под повторное сооружение в условиях ЭНИЦ**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева; исполнители: инженеры С.В. Тимкин, А.В. Столпник, Н.П. Ларионов, В.Ф. Домрин*

Рассмотрены основные работы, направленные на модернизацию стенда, связанную с новой идеологией экспериментальных исследований, а также условиями размещения и энергообеспечения стенда в ЭНИЦ, проведен анализ основных характеристик оборудования и систем стенда. Определены пути модернизации стенда, направленные на реализацию на стенде наихуд-

ших сценариев развития аварийного процесса и адаптации оборудования стенда к условиям ЭНИЦ.

*Стенд ТКР как основное экспериментальное средство изучения множественного разрушения технологических каналов РБМК. Модификация и переоснащение стенда под повторное сооружение в условиях ЭНИЦ: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: С.В. Тимкин, А.В. Столпник, Н.П. Ларионов, В.Ф. Домрин. — Электрогорск, 1999. — 35 с. — Инв. № 6.527.*

### **Исследование способов моделирования термомеханического разрушения канальной трубы РБМК при авариях с прекращением циркуляции теплоносителя**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева; исполнители: инженеры С.В. Родионов, С.В. Калашникова, А.А. Тарасова*

Аналитически исследован способ нагрева циркониевой трубы с целью реализации схемы термомеханического разрушения канала в заданном сечении, в заданном направлении и необходимой площади. Рассмотрены возможные варианты конструкции нагревателей и определены технические требования к материалам нагревателей.

*Исследование способов моделирования термомеханического разрушения канальной трубы РБМК при авариях с прекращением циркуляции теплоносителя: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: С.В. Родионов, С.В. Калашникова, А.А. Тарасова. — Электрогорск, 1999. — 44 с. — Инв. № 6.525.*

### **Расчётно-экспериментальное моделирование поведения и разрушения одиночной трубы ТК РБМК в аварийных условиях ЛОСА**

*Руководитель работы канд. техн. наук В.А. Гашенко; исполнители: канд. техн. наук В.Д. Локтионов, инженеры О.Н. Абакумова, Н.И. Ярошенко, Н.М. Меркулова*

Проведено экспериментальное исследование поведения одиночной трубы ТК РБМК из сплава Zr-2,5%Nb в режиме сверхпластического деформирования при аварии типа ЛОСА, нагруженной внутренним давлением 0,8 МПа и находящейся в режиме выдержки при температуре 1060 К до момента её разрушения. Полученные результаты предназначены для уточнения критериев разрушения реальных ТК.

*Расчётно-экспериментальное моделирование поведения и разрушения одиночной трубы ТК РБМК в аварийных условиях ЛОСА: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.А. Гашенко; исполн.: В.Д. Локтионов, О.Н. Абакумова, Н.И. Ярошенко, Н.М. Меркулова. — Электрогорск, 1999. — 41 с. — Инв. № 4.537.*

## **Определение оптимальной концентрации кислорода, необходимой для пассивации углеродистой стали в условиях эксплуатации питательного тракта АЭС с РБМК**

*Руководитель работы канд. техн. наук В.А. Гашенко;*

*исполнители: инженер О.Н. Абакумова, канд. техн. наук Б.А. Кольчугин, инженеры В.Н. Белоус, В.А. Юрманов*

Проведены коррозионные стендовые испытания образцов углеродистой стали 20 применительно к условиям питательного тракта реактора РБМК-1000 ( $T=165\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) при различных ( $45\text{ мкг/м}^3$  и  $60\text{ мкг/м}^3$ ) концентрациях кислорода. На основании полученных экспериментальных данных оптимальная величина концентрации кислорода, рекомендуемая для дозирования в питательный тракт АЭС с РБМК-1000 при внедрении НКВР, может быть оценена в  $50\text{--}60\text{ мкг/м}^3$ , поскольку уже при данных концентрациях на поверхности стали 20 формируется плотная защитная пассивная оксидная плёнка и имеет место незначительный вынос продуктов коррозии в поток теплоносителя.

*Определение оптимальной концентрации кислорода, необходимой для пассивации углеродистой стали в условиях эксплуатации питательного тракта АЭС с РБМК: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.А. Гашенко; исполн.: О.Н. Абакумова, Б.А. Кольчугин, В.Н. Белоус, В.А. Юрманов. — Электрогорск, 1999. — 28 с. — Инв. № 4.536.*

## **Разработка нагревателя на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза СВС для экспериментального стенда ТКР**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Юхвид;*

*исполнители: канд. техн. наук В.Н. Санин, В.А. Горшков, В.И. Ратников, инженер С.П. Синев, от ЭНИЦ: канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева, инженеры С.В. Родинов, А.А. Тарасова, С.В. Калашникова*

Смоделирован аварийный разогрев единичной циркониевой трубы в графитовом блоке с помощью высокоэкзотермической смеси термитного типа и электрического нагревателя из оксида циркония (до температуры  $600\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) при атмосферном давлении. С этой целью спроектирован и изготовлен стенд для исследования динамики теплообмена термитного нагревателя и стенок трубы в рабочей ячейке стенда, в котором проведены исследования, показавшие возможность использования термитного нагревателя для разогрева циркониевой трубы в рабочей ячейке стенда до критической температуры, необходимой для разрушения циркониевой трубы под давлением газа. Температура разогрева трубы может регулироваться с помощью состава термитной смеси и величины зазора между термитной шашкой и стенкой циркониевой трубы, а также конструкции термитной шашки. Спроектирована и изготовлена установка для СВС композиционных труб из оксида циркония и нихрома. Проведены исследования и показана

возможность изготовления по технологии СВС трубчатого электрического нагревателя. Полученные электрофизические характеристики электрического нагревателя позволяют использовать его для нагрева до критической температуры, необходимой для разрушения циркониевой трубы под давлением газа.

*Разработка нагревателя на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза СВС для экспериментального стенда ТКР: отчет о НИР / ИЦ СВС ИСМАН; рук. В.И. Юхвид; исполн.: В.Н. Санин, В.А. Горшков, В.И. Ратников и др. — Черноголовка, 2000. — 51 с. — Инв. № 6.557 (ЭНИЦ).*

### **Исследование деформирования и теплового состояния трубы с графитовыми элементами ТК РБМК в аварийных условиях типа ЛОСА**

*Руководитель работы канд. техн. наук В.Д. Локтионов;  
исполнители: инженер Н.И. Ярошенко, В.А. Гашенко,  
инженеры О.Н. Абакумова, Н.М. Меркулова*

Представлены результаты экспериментального исследования термомеханического поведения фрагмента технологического канала (ТК) реактора РБМК, состоящего из циркониевой трубы (сплав Zr-2,5% Nb) и графитовых элементов (кольца и блоки), в условиях быстрого разогрева и переменного во времени давления внутри исследуемой трубы ТК. При проведении эксперимента была достигнута скорость разогрева трубы исследуемого фрагмента ТК, превышающая 5 градусов в секунду. Давление в трубе изменялось в процессе эксперимента от 3 до 5,1 МПа. Эксперименты проводились на стенде К-6, оснащенный соответствующей измерительной и регистрирующей аппаратурой. Разогрев фрагмента ТК осуществлялся по схеме прямого нагрева путем пропускания электрического тока через трубу исследуемого макета ТК. Разрушение исследуемой трубы произошло в районе нижнего сварного шва циркониевой трубы вследствие ее локального перегрева.

Отмечается, что впервые для отечественной практики в данной области исследований получены следующие результаты:

- достигнута скорость разогрева более 5 градусов в секунду для фрагмента трубы ТК РБМК с графитовыми элементами в условиях, имитирующих сценарий аварии с потерей теплоносителя типа ЛОСА;
- продемонстрирована и реализована возможность использования схемы прямого нагрева трубы ТК, находящейся в графите, путем пропускания через нее электрического тока для достижения высоких скоростей нагрева.
- отмечается, что полученные результаты могут быть использованы для целей дальнейшего уточнения характера поведения элементов ТК при авариях с нарушением штатного режима теплосъема в реакторах канального типа, верификации расчетных программ и кодов по моделированию поведения и разрушения элементов ТК в аварийных

условиях, а также использованы при решении частных задач проблем одиночного и множественного разрывов ТК РБМК.

*Исследование деформирования и теплового состояния трубы с графитовыми элементами ТК РБМК в аварийных условиях типа ЛОСА: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.Д. Локтионов; исполн.: Н.И. Ярошенко, В.А. Гашенко, О.Н. Абакумова, Н.М. Меркулова. — Электрогорск, 2000. — 36 с. — Инв. № 6.538.*

### **Концептуальная программа аналитических и экспериментальных исследований по проблеме множественного разрушения технологических каналов РБМК**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева; научный руководитель работы д-р физ.-мат. наук. Р.В. Гольдштейн; исполнители: от ЭНИЦ: инженер А.С. Сергеев, С.В. Тимкин, С.В. Калашникова, С.В. Родинов; от ИПМ: д-р физ.-мат. наук. Ю.Н. Гордеев, канд. физ.-мат. наук К.Г. Корнев, канд. техн. наук Н.М. Осипенко*

Представлен теоретико-экспериментальный анализ проблемы множественного зависимого разрушения топливных каналов (МРТК) реактора РБМК. С целью обоснования основных положений безопасной эксплуатации РБМК в ЭНИЦ сооружается экспериментальная установка, содержащая 25 полномасштабных колонн РБМК с технологическими каналами. Результаты, полученные на 25-канальном стенде, будут дополнены исследованиями на экспериментальных установках меньшего масштаба для лучшего понимания механизмов разрушения топливных каналов и получения эмпирических соотношений для преобладающих эффектов. Представлено описание стендов, на которых будут выполнены исследования в соответствии с предполагаемой последовательностью реализации этапов МРТК. Исследования на маломасштабных стендах частично могут выполняться параллельно. Результаты этих исследований будут служить основой для выявления наиболее опасных ситуаций в сценариях МРТК, а также для выбора условий для проведения экспериментов на полномасштабном стенде, направленных на проверку этих сценариев. Показана взаимосвязь между исследуемыми этапами гипотетического МРТК, испытаниями, необходимыми для его количественного описания, и проектируемыми стендами, предназначенными для проведения этих испытаний. Представлена стратегия экспериментально-теоретического анализа проблемы МРТК, на современном уровне. Очерчен круг задач, решение которых может быть получено путем физического моделирования на специальных стендах. Показано, что представленные выше стенды достаточны для выполнения представленных задач. Приведены основные типы экспериментальных исследований, которые необходимо провести на этих стендах.

*Концептуальная программа аналитических и экспериментальных исследований по проблеме множественного разрушения технологических каналов РБМК: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук.: Н.Ю. Медведева, Р.В. Гольдштейн; исполн.:*

*А.С. Сергеев, С.В. Тимкин, С.В. Калашникова и др. — Электрогорск, 2000. — 32 с. — Инв. № 6.553.*

## **Работы применительно к реакторной установке АСТ-500**

### **Исследование теплосъёма и параметров потока теплоносителя в контуре естественной циркуляции реакторной установки АСТ-500 в номинальных и аварийных режимах**

*Научный руководитель работы канд. техн. наук А.Г. Лобачев; исполнители: инженер Н.И. Трубкин, А.М. Попов, Т.В. Карпова; от ЭНИИ — канд. техн. наук Б.А. Кольчугин, Э.И. Ливерант, Э.А. Захарова*

Описан экспериментальный стенд с моделью контура естественной циркуляции РУ АСТ-500 с натурными высотными отметками. Получены экспериментальные данные по теплогидравлическим характеристикам контура в режиме естественной циркуляции теплоносителя, температурным режимам модели активной зоны и динамическим характеристикам при осушении и повторном заливе модели ТВС, влиянию газосодержания на локальные температуры в теплообменнике. Опытные данные получены в следующем диапазоне изменения режимных параметров: давление  $P=1,0-5,0$  МПа, массовая скорость  $\rho W=750$  кг/(м<sup>2</sup>·с), плотность теплового потока  $q=0,27$  МВт/м<sup>2</sup>.

*Исследование теплосъёма и параметров потока теплоносителя в контуре естественной циркуляции реакторной установки АСТ-500 в номинальных и аварийных режимах: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук. А.Г. Лобачев; исполн.: Н.И. Трубкин, А.М. Попов, Т.В. Карпова и др. — Электрогорск, 1991. — 76 с. — Инв. № 2.388 (ЭНИС).*

## **Работы исследовательско-поискового характера**

### **Отработка локальных и интегральных методов диагностики двухфазного адиабатического потока применительно к циркуляционным контурам АЭС**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.Г. Лобачев; исполнители: инженеры Н.И. Трубкин, С.В. Зевалкин, инженеры А.М. Попов, О.Г. Карпова, Ж.С. Струневская*

Выполнена холодная и горячая тарировка термостойкого нейтронного датчика плотности пароводяной смеси и проведены эксперименты по измерению плотности пароводяной смеси на теплофизическом стенде. На стенде сконструирована и смонтирована гамма-просвечивающая установка, позволяющая определять истинное объёмное паросодержание ( $\phi$ ). Для определения локальных значений  $\phi$  разработан и внедрён измерительный комплекс с использованием кондуктометрических зондов.

*Отработка локальных и интегральных методов диагностики двухфазного адiabатического потока применительно к циркуляционным контурам АЭС: отчет о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС; рук. А.Г. Лобачев; исполн.: Н.И. Трубкин, С.В. Зевалкин, А.М. Попов и др. — Электрогорск, 1991. — 385 с. — Инв. № 1.392.*

### **Экспериментальное исследование скоростей изменения парового объёма и размеров межфазных границ и коэффициентов теплообмена при конденсации в неравновесных двухфазных потоках**

*Руководители работы: чл.-кор. АН СССР Г.Н. Кружилин (ЭНИИ), канд. техн. наук А.Г. Лобачев;*

*исполнители: канд. техн. наук Е.И. Трубкин, С.З. Лутовинов, инженеры С.В. Зевалкин, Н.С. Куракина, К.М. Малова, Ж.С. Струневская; от ЭНИИ: канд. техн. наук Б.А. Кольчугин, Р.И. Созиев, В.И. Гудков, инженеры О.Г. Бартоломей, П.В. Шведов*

Экспериментально отработана на специальном стенде методика визуального исследования процессов конденсации паровой фазы в двухфазном потоке с помощью фотосъёмки через смотровые окна. Для давления 1, 3 и 7 МПа, скоростей потока от 1 до 2,5 м/с и выходных недогревах от 3 до 9 °С, получены опытные данные, содержащие фотографии картин течения неравновесного двухфазного потока в трёх по высоте сечениях канала. Полученные данные позволяют определить изменение паросодержания по высоте канала, а также величины межфазных поверхностей и коэффициентов теплоотдачи в неравновесном двухфазном потоке.

*Экспериментальное исследование скоростей изменения парового объёма и размеров межфазных границ и коэффициентов теплообмена при конденсации в неравновесных двухфазных потоках: отчет о НИР/ЭНИС ВНИИАЭС, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского; рук.: Г.Н. Кружилин, А.Г. Лобачев; исполн.: Е.И. Трубкин, С.З. Лутовинов, С.В. Зевалкин и др. — Электрогорск, 1991. — 153 с. — Инв. № 2.385.*

### **Анализ и обобщение данных и разработка расчётных рекомендаций по конденсации пара в потоке подогретой жидкости**

*Руководители работы: канд. техн. наук А.Г. Лобачёв, А.Г. Агеев, К.И. Сопленков; исполнители: канд. техн. наук С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин, инженеры Ж.С. Струневская, Н.С. Куракина, техник К.М. Малова, канд. техн. наук Б.А. Кольчугин, В.И. Гудков, инженер П.В. Шведов*

Представлена экспериментально отработанная методика визуального исследования процессов конденсации пара в двухфазном потоке с помощью фотосъёмки через смотровые окна, расположенные на четырёх уровнях на высоте участка, с помощью которой получены данные и сделана первичная обработка материалов фотосъёмки для следующих режимных параметров:

- давление в рабочем участке — 10, 30, 70 бар;
- входные недогревы — 3,6 и 9 °С;
- скорость циркуляции — 1–2,5 м/с;
- расходное паросодержание — до 0,15.

Отмечается, что полученный материал позволяет определить изменение паросодержания по высоте канала, а также величины межфазных поверхностей и коэффициентов теплоотдачи в неравновесном двухфазном потоке.

Также предложена расчётная зависимость для определения скорости конденсации паровой фазы, хорошо описывающая полученный экспериментальный материал.

*Анализ и обобщение данных и разработка расчётных рекомендаций по конденсации пара в потоке подогретой жидкости: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук.: А.Г. Лобачёв, А.Г. Агеев, К.И. Сопленков; исполн.: С.З. Лутовинов, Е.И. Трубкин, Ж.С. Струневская и др. — Электрогорск, 1992. — 198 с. — Инв. № 2.399.*

### **Перемешивание расплава с охладителем и распространение термической детонации**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук О.И. Мелихов;  
исполнители: канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов,  
инженер П.В. Селиверстов*

Проанализированы процессы протекания крупномасштабного парового взрыва при тяжёлых авариях на АЭС. Представлены результаты собственных исследований различных аспектов парового взрыва. С помощью полученных результатов по устойчивости струи расплава в охладителе сделана оценка длины распада струи, которая хорошо согласуется с имеющимися в литературе опытными данными. Разработаны компьютерные коды для моделирования процессов предварительного перемешивания расплава с охладителем и распространения волны термической детонации.

*Перемешивание расплава с охладителем и распространение термической детонации: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. О.И. Мелихов; исполн.: В.И. Мелихов, П.В. Селиверстов. — Электрогорск, 1993. — 106 с. — Инв. № 13.408.*

### **Комплексный расчёт парового взрыва в шахте реактора**

*Руководители работы: канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов,  
канд. техн. наук Г.В. Осокин;  
исполнители: канд. физ.-мат. наук О.И. Мелихов, канд. техн. наук В.Р. Цой,  
инженер В.В. Волков*

В работе приводятся результаты расчётов внекорпусного парового взрыва в шахте реактора с помощью разработанного в ЭНИЦ кода VAREX для моделирования парового взрыва при тяжёлых авариях на АЭС.

Приведено описание созданной экспериментальной установки для исследования парового взрыва при взаимодействии высокотемпературного расплава металла с водой и результаты проведённых на ней серии экспериментов по изучению спонтанного парового взрыва.

Исследования проводились на двух рабочих участках — сосудах диаметром 180 мм и высотой 0,8 м и 2 м. В качестве расплава использовался расплав железа, образующийся при горении термитной смеси ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ ).

Было проведено 25 опытов, в которых варьировались масса расплава от 0,5 до 1,5 кг, температура расплава от 2000 до 3000 °С, масса воды от 5 до 20 кг. Расплав вводился в воду в виде одной струи диаметром 30 мм и нескольких струй диаметром 15 мм. Паровой взрыв состоялся в четырёх опытах. В этих случаях импульс давления достигал 5–6 МПа, а расплав в результате взрыва превращался в мелкодисперсный порошок.

*Комплексный расчёт парового взрыва в шахте реактора: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук.: В.И. Мелихов, Г.В. Осокин; исполн.: О.И. Мелихов, В.Р. Цой, В.В. Волков. — Электрогорск, 1994. — 53 с. — Инв. № 13.424.*

### **Экспериментальная установка и исследование барботажной схемы фильтрации**

*Руководитель работы канд. техн. наук Г.В. Осокин;  
исполнители: инженеры В.Д. Булынин (от ВНИИАЭС), С.В. Смирнов,  
С.П. Борисов*

Проведены испытания барботажной схемы фильтрации без и с наличием встроенных струйных инжекторов-конденсаторов при температуре воды в мокром фильтре от 20 до 100 °С применительно к системам локализации аварий на АЭС. В качестве аэрозолей использовались аэрозоли турбинного масла. Получены опытные данные по коэффициентам фильтрации испытанных схем и гидродинамическим характеристикам струйных конденсаторов.

*Экспериментальная установка и исследование барботажной схемы фильтрации: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Г.В. Осокин; исполн.: В.Д. Булынин, С.В. Смирнов, С.П. Борисов. — Электрогорск, 1994. — 78 с. — Инв. № 5.411.*

### **Разработка методики, алгоритмов и кода для расчёта методом конечных элементов тепловых потерь в конструкциях ядерно-энергетических установок**

*Руководитель темы канд. техн. наук В.Д. Локтионов;  
исполнители: канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева,  
инженеры С.Ю. Кривуля, Н.И. Ярошенко*

Объект исследования — температурное поле в конструкциях ядерно-энергетических установок.

Целью работы является разработка алгоритмов решения стационарной нелинейной задачи теплообмена и их программная реализация.

В качестве метода расчёта тепловых полей избран метод конечных элементов.

Приведены полученные основные соотношения для расчёта температурных полей, разработанные конечные элементы, необходимые для решения тепловых задач с краевыми условиями общего вида. Отмечается, что созданы препроцессорные средства подготовки исходных данных для моделирования корпуса реактора типа ВВЭР, решена демонстрационная модельная задача, имитирующая фрагмент корпуса ядерного реактора, а

представленные результаты являются первым шагом в анализе термосилового поведения корпуса реактора в процессе тяжёлой аварии.

*Разработка методики, алгоритмов и кода для расчёта методом конечных элементов тепловых потерь в конструкциях ядерно-энергетических установок: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.Д. Локтионов; исполн.: Н.Ю. Медведева, С.Ю. Кривуля, Н.И. Ярошенко. — Электрогорск, 1994. — 89 с. — Инв. № 6.416.*

### **Компьютерный банк опытных данных. Распределение жидкости между плёнкой и ядром потока в условиях гидродинамического равновесия**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук Я.Д. Ходжаев; исполнитель канд. физ.-мат. наук О.И. Мелихов*

Создан компьютерный банк опытных данных на базе экспериментальных исследований по распределению жидкости между ядром потока и пристенной жидкой плёнкой в гидродинамически равновесном дисперсно-кольцевом потоке, выполненных в период с 1978 по 1987 год. Банк данных охватывает широкий диапазон режимных параметров:  $\rho W = 500\text{--}4000$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $P = 1\text{--}16$  МПа,  $X = 0,05\text{--}1$ . Эксперименты проводились на 6 экспериментальных каналах диаметром 13,3, 8,20 и 25,9 мм.

*Компьютерный банк опытных данных. Распределение жидкости между плёнкой и ядром потока в условиях гидродинамического равновесия: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Я.Д. Ходжаев; исполн. О.И. Мелихов. — Электрогорск, 1994. — 111 с. — Инв. № 13.413.*

### **Разработка программного комплекса для моделирования гидродинамических и теплофизических процессов в элементах контейнента. Этап 1**

*Л.И. Зайчик, Б.И. Нигматулин, В.А. Першуков, В.В. Рус, Е.М. Смирнов*

Описаны результаты, полученные при реализации первого этапа работы, направленной на создание отечественных трехмерных гидродинамических и теплофизических кодов. В перспективе, система кодов позволит выполнять работы по моделированию всей совокупности физико-химических процессов, протекающих в объеме контейнента. Отмечается, что построение программного комплекса, позволяющего провести с приемлемой точностью вычислительный эксперимент, является чрезвычайно сложной задачей и до сих пор не имеет реализации во всей полноте не только в России, но и за рубежом. Основные результаты, полученные к настоящему времени и представленные в работе, сводятся к следующему:

- представлена общая характеристика разрабатываемого программного комплекса для моделирования гидродинамических и теплофизических процессов в элементах контейнента;

- представлена математическая модель и разработан численный алгоритм для расчета гидродинамики турбулентного потока в элементах контейнента;
  - выполнены расчеты осредненных и пульсационных характеристик трехмерного течения, формирующегося при симметричном и несимметричном локализованном выбросе парогазовой смеси в условиях проектной аварии;
  - предложена диффузионно-инерционная модель для описания распространения и осаждения мелкодисперсных аэрозольных частиц в турбулентных потоках; проведенное тестирование свидетельствует о применимости предложенной модели для расчета как свободных, так и пристеночных турбулентных двухфазных течений;
  - представлена математическая модель для расчета распределения водорода в контейненте; проведенные оценки свидетельствуют об отсутствии стратификации по высоте контейнента, т.е. о пренебрежимо малом влиянии бародиффузии на распределение водорода.
- Л.И. Зайчик, Б.И. Нигматулин, В.А. Першуков, В.В. Рис, Е.М. Смирнов. Разработка программного комплекса для моделирования гидродинамических и теплофизических процессов в элементах контейнента. Этап 1. — Электрогорск, 1994. — 50 с. — (Препринт / ЭНИЦ ВНИИАЭС; №Л14-01/1994.09).*

### **Моделирование кодом ATHLET процессов колебания уровня и истечения вскипающей жидкости**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов;  
исполнители: канд. физ.-мат. наук О.И. Мелихов, инженеры  
Э.Ю. Щепетьников, Т.В. Урбан, техники М.Н. Абрамова, Г.А. Дроздова*

Как отмечается в работе, в соответствии с договором между GRS и ЭНИЦ в 1995 году ЭНИЦ был передан системный теплогидравлический код ATHLET для его освоения и проведения в дальнейшем верификационной работы на базе экспериментальных данных ЭНИЦ.

Изложены результаты верификации кода ATHLET на двух тестовых задачах. В первой части рассмотрена задача о колебаниях столба жидкости в U-образном манометре. Проведено сравнение численного и аналитического решения. Изучено влияние схемных параметров на поведение численного решения. Во второй части проведено моделирование кодом ATHLET эксперимента Эдвардса по нестационарному истечению вскипающей жидкости из трубы. В расчётах использовались различные модели критического истечения. Получено хорошее совпадение расчётных и экспериментальных данных.

*Моделирование кодом ATHLET процессов колебания уровня и истечения вскипающей жидкости: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Мелихов; исполн.: О.И. Мелихов, Э.Ю. Щепетьников, Т.В. Урбан и др. — Электрогорск, 1995. — 29 с. — Инв. № 13.441.*

## **Экспериментальное исследование эффективности комбинированных водно-кислородных кислотных обработок отложений на внутренней поверхности испарительных труб из углеродистой стали**

*Руководитель работы инженер А.Ф. Абдуллаев;*

*исполнители: инженер Н.Н. Савинова, инженер О.В. Шатерникова*

Экспериментально изучено гравиметрическим и электрохимическим способом (с помощью проточной электрохимической ячейки) влияние температуры (в диапазоне 60–150 °С) и концентрации растворённого кислорода (в диапазоне 0–1 мг/л) на ЭКИ стали 20 применительно к ВХР 2-го контура АЭС с ВВЭР. Приведена величина вклада химической и электрохимической коррозии в общий процесс эрозивно-коррозионного износа. Получены экспериментальные данные стендовых исследований влияния растворённого в воде кислорода на скорость коррозии стали 20 при различных водно-химических режимах. Получены экспериментальные результаты водно-кислородно-углекислотной обработки отложений труб, изучена возможность применения окислительных обработок трубопроводов из углеродистой стали в условиях работы АЭС.

*Экспериментальное исследование эффективности комбинированных водно-кислородных кислотных обработок отложений на внутренней поверхности испарительных труб из углеродистой стали: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. А.Ф. Абдуллаев; исполн.: Н.Н. Савинова, О.В. Шатерникова. — Электрогорск, 1995. — 55 с. — Инв. № 8.477.*

## **Разработка программного комплекса для моделирования гидродинамических и теплофизических процессов в элементах контейнента. Этап 2**

*Л.И. Зайчик, Б.И. Нигматулин, В.А. Першуков, В.В. Рис, Е.М. Смирнов, А.А. Винберг, В.А. Белов*

Представлены результаты второго этапа создания программного комплекса для моделирования гидродинамических и теплофизических процессов в элементах контейнента, а именно:

- представлена разработанная математическая модель для расчета гидродинамики и конвективного теплопереноса трехмерного нестационарного турбулентного течения в контейменте;
- данные выполненных расчетов нестационарного течения на начальной стадии развития аварии и по определению характерного времени формирования стационарных (или квазистационарных) гидродинамических вихревых структур в объеме контейнента;
- данные расчетов гидродинамической структуры течения в подкупольном пространстве для вентиляционных режимов циркуляции теплоносителя в контейменте;
- численного исследования течения в подкупольном пространстве контейнента при совместном действии вынужденной и свободной

конвекции, показавшего, что для установившихся режимов циркуляции теплоносителя влияние свободной конвекции на характеристики течения в контейменте носит второстепенный характер;

- данные по определению температурных полей в подкупольном пространстве и распределение коэффициента теплоотдачи между внутренней поверхностью контеймента и турбулентным потоком в его объеме;
- обобщена математическая модель для описания распространения и осаждения мелкодисперсных аэрозолей на случай формирования отрывных течений на стенках контеймента;
- выполнены расчеты нестационарных полей концентраций мелкодисперсных аэрозолей и определены места локализации наиболее интенсивного осаждения.

*Зайчик Л.И., Нигматулин Б.И., Першуков В.А. и др. Разработка программного комплекса для моделирования гидродинамических и теплофизических процессов в элементах контеймента. Этап 2. — Электрогорск, 1996. — 33 с. — (Препринт / ЭНИЦ ВНИИАЭС; №Л14-02/1995.01).*

### **Комплексное экспериментальное исследование парового взрыва для верификации кодов по тяжёлым авариям**

*Руководитель работы канд. техн. наук В.Р. Цой;  
исполнители: канд. техн. наук Ю.П. Ивочкин, В.В. Глазков,  
инженеры Е.В. Волков, В.Г. Швеи, А.А. Савинов, А.А. Оксман*

Разработаны экспериментальные стенды, методики измерений, развита методология комплексного исследования всех стадий парового взрыва, обеспечивающая получение новых опытных данных для верификации расчётных кодов по тяжёлым авариям, в том числе создан среднемасштабный экспериментальный стенд для исследования процесса предварительного перемешивания расплава с водой. Разработаны новые методы измерений на основе волоконно-оптических датчиков и системы «технического зрения», проведены экспериментальные исследования взаимодействия твёрдой сферической поверхности с водой, исследованы процессы развития неустойчивости и разрушения парового слоя.

*Комплексное экспериментальное исследование парового взрыва для верификации кодов по тяжёлым авариям: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.Р. Цой; исполн.: Ю.П. Ивочкин, В.В. Глазков, Е.В. Волков и др. — Электрогорск, 1996. — 103 с. — Инв. № 15.471.*

### **Двухфазные измерения на крупномасштабном французском стенде ВЕТНСУ**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнители: инженеры Г.И. Дремин, С.А. Галчанская*

Представлен обзор измерительной системы французского крупномасштабного интегрального стенда ВЕТНСУ, параметры и задачи которого

сходны с параметрами и задачами стенда ПСБ-ВВЭР. В работе освещены методика и техника измерений параметров двухфазного потока, подробно описаны принципы работы и характеристики используемых на ВЕТНСУ двухфазных измерительных устройств: гамма-денситометров, турборасходомеров, турбозондов. а также обсуждается методика их калибровки. Данная работа – результат стажировки авторов на стенде ВЕТНСУ, организованной группой поддержки российского стенда ПСБ-ВВЭР в рамках деятельности организации OECD/NEA.

*Двухфазные измерения на крупномасштабном французском стенде ВЕТНСУ: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: Г.И. Дремин, С.А. Галчанская. — Электрогорск, 1997. — 53 с. — Инв. № 2.485.*

### **Сравнительный анализ интегральных кодов MARCH-3, MELCOR 1.8.2 и МААР-4, предназначенных для расчётного анализа тяжёлых аварий на АЭС (общая идеология, расчётные схемы, алгоритмы расчёта)**

*Петухов С.М., Нигматулин Б.И., Хасанов Р.Х.*

В рамках работ по созданию отечественного интегрального (системного) кода, проводимых в ЭНИЦ, выполнен сравнительный анализ наиболее часто используемых интегральных кодов для анализа теплогидравлических процессов, происходящих при тяжёлых авариях на АЭС с легководными реакторами (MARCH-3, MELCOR 1.8.2 и МААР-4).

Проведено сравнение основной «идеологии» (или глобальной стратегии расчётного анализа) особенностей используемых численных алгоритмов.

*Петухов С.М., Нигматулин Б.И., Хасанов Р.Х. Сравнительный анализ интегральных кодов MARCH-3, MELCOR 1.8.2 и МААР-4, предназначенных для расчётного анализа тяжёлых аварий на АЭС (общая идеология, расчётные схемы, алгоритмы расчёта). — Электрогорск, 1997. — 64 с. — (Препринт / ЭНИЦ ВНИИАЭС; № Л11-34/1997).*

### **Разработка конечно-разностного варианта кода NARAL/CAVITY. Решение задач конвективно-диффузионного переноса в двумерных областях сложной геометрической формы. Краткое описание программного комплекса CDCL\_2D**

*Нигматулин Б.И., Блинков В.Н., Хасанов Р.Х., Югов В.П., Скибин А.П., Глебов С.Ф., Макаров Д.В., Герасимов А.В.*

В работе содержится краткое описание программного комплекса CDCL\_2D, предназначенного для решения уравнений конвективно-диффузионного переноса в двумерной области произвольной формы.

Приведены результаты решения 11 задач, использовавшихся для тестирования программного комплекса. Численные результаты сравниваются с аналитическими решениями, на основе чего делается вывод о работоспособности и точности созданного программного обеспечения.

*Нигматулин Б.И., Блинков В.Н., Хасанов Р.Х. и др. Разработка конечно-разностного варианта кода NARAL/CAVITY. Решение задач конвективно-диффузионного*

*переноса в двумерных областях сложной геометрической формы. Краткое описание программного комплекса CDCL\_2D. — Электрогорск, 1997. — 166 с. — (Препринт / ЭНИЦ ВНИИАЭС; №Л11/35-97).*

### **Капельный влагообмен между ядром и пристенной плёнкой жидкости при течении газо-парожидкостных дисперсно-кольцевых потоков (компьютерный банк опытных данных)**

*Нигматулин Б.И., Ходжаев Я.Д.*

В работе представлен банк опытных данных на базе результатов экспериментальных исследований по интенсивности осаждения капель на поверхности плёнки, интенсивности динамического срыва капель с поверхности плёнки, условиям начала динамического уноса капель с поверхности плёнки потоком газа, интенсивности уноса капель с поверхности плёнки в турбулентном дисперсно-кольцевом потоке, по распределению расхода жидкости в плёнках газожидкостного дисперсно-кольцевого потока.

Банк данных охватывает широкий диапазон режимных параметров: для пароводяных смесей  $D=8, 13, 13,1, 13,2$  мм,  $P=1,0 - 16,0$  МПа,  $w_1=4-120$  м/с,  $\alpha_2=0,005 - 0,1$ ; для воздушно-водяных смесей  $D=13, 25, 31,5, 31,75, 31,8$  и  $52$  мм,  $P=0,18, 0,3$  и  $0,45$  МПа,  $w_1=8 - 60$  м/с,  $\alpha_2 = (0,9 - 5) \cdot 10^{-3}$ .

*Нигматулин Б.И., Ходжаев Я.Д. Капельный влагообмен между ядром и пристенной плёнкой жидкости при течении газо-парожидкостных дисперсно-кольцевых потоков (компьютерный банк опытных данных). — Электрогорск, 1997. — 132 с. — (Препринт / ЭНИЦ ВНИИАЭС; № Л15/04-97).*

### **Разработка математических средств анализа состояния энергоблока**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфёнов, инженер Г.В. Бычкова*

Представлены разработанные методики, позволяющие оперативно оценивать следующие характеристики энергоблока:

- размер течи из первого контура АЭС с ВВЭР;
- прогноз времени оголения активной зоны;
- выход продуктов деления в первый контур, осаждение в защитной оболочке, выход во вспомогательные помещения, фильтрация;
- выход продуктов деления за границы блока;
- степень риска взрыва водорода.

На основе разработанных методик планируется создание программного средства для оперативного прогнозирования развития аварийного процесса на энергоблоке АЭС.

*Разработка математических средств анализа состояния энергоблока: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Мелихов; исполн.: Ю.В. Парфёнов, Г.В. Бычкова. — Электрогорск, 2000. — 42 с. — Инв. № 13.560.*

## Работы прикладного характера

### **Испытание элементов запорных устройств ШАДР поверхностно-упрочнённых ионным азотированием и ионно-плазменным покрытием**

*Руководитель работы канд. техн. наук В.А. Гашенко, исполнители: инженеры О.Н. Абакумова, В.Н. Иванов (от КуАЭС), А.Т. Державин (от НИКИЭТ)*

Проведены сравнительные стендовые испытания крепёжных деталей узла уплотнений ШАДР, выполненных из высокопрочной мартенситно-ста-реющей стали марки 06X13H7D2 и аустенитной нержавеющей стали марки 08X18H10T и штатного крепежа с использованием и без использования поверхностного упрочнения резьбовой части ионным азотированием и ионно-плазменным покрытием. Получены данные стендовых испытаний элементов запорного узла ШАДР и даны рекомендации к промышленной проверке полученных результатов исследования на действующих энергоблоках КуАЭС.

*Испытание элементов запорных устройств ШАДР поверхностно-упрочнённых ионным азотированием и ионно-плазменным покрытием: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. В.А. Гашенко; исполн.: О.Н. Абакумова, В.Н. Иванов, А.Т. Державин. — Электрогорск, 1991. — 34 с. — Инв. № 4.382.*

### **Разработка и внедрение технологии защиты конденсаторов турбин и другого теплообменного оборудования ЮУ АЭС от солеотложений из охлаждающей воды пассивацией теплопередающих поверхностей комплексом ОЭДФК**

*Руководитель работы канд. техн. наук Г.П. Угрехелидзе; исполнители: канд. техн. наук В.А. Николаев, инженер Л.В. Птицина*

Проведён первый этап промышленных испытаний технологии по предотвращению карбонатных отложений на конденсаторах турбин ЮУ АЭС с применением оксиэтилендифосфоновой кислоты (ОЭДФК). На основании промышленных испытаний произведена оценка технико-экономической эффективности внедрения технологии на двух энергоблоках ЮУ АЭС.

*Разработка и внедрение технологии защиты конденсаторов турбин и другого теплообменного оборудования ЮУ АЭС от солеотложений из охлаждающей воды пассивацией теплопередающих поверхностей комплексом ОЭДФК: отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Г.П. Угрехелидзе; исполн.: В.А. Николаев, Л.В. Птицина. — Электрогорск, 1991. — 53 с. — Инв. № 7.394.*

### **Разработка и внедрение технологии защиты конденсаторов турбин ТЭЦ Благовещенского биохимкомбината (ББХК) от солеотложений из охлаждающей воды путём пассивации конденсаторных труб растворами комплекса ОЭДФК**

*Руководитель работы канд. техн. наук Г.П. Угрехелидзе; исполнители: канд. техн. наук В.А. Николаев, инженер Л.В. Птицина*

В задачу работы входило проведение промышленных испытаний технологии по предотвращению карбонатных отложений с применением ОЭДФК

на конденсаторах турбин ТЭЦ ББХК, разработанной на базе выполненных экспериментальных работ. Дана оценка технико-экономической эффективности внедрения технологии на ТЭЦ ББХК.

*Разработка и внедрение технологии защиты конденсаторов турбин ТЭЦ Благоевещенского биохимкомбината (ББХК) от солеотложений из охлаждающей воды путём пассивации конденсаторных труб растворами комплексона ОЭДФК: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Г.П. Угрехелидзе; исполн.: В.А. Николаев, Л.В. Птицина. — Электрогорск, 1992. — 54 с. — Инв. № 7.402.*

### **Разработка и установка защиты проточной части паровых турбин Волжской ТЭЦ-1 от стояночной коррозии**

*Руководитель темы канд. техн. наук Л.Я. Россихин;  
исполнитель канд. техн. наук В.А. Николаев*

Разработана схема консервации турбин и инструкции по её применению. Разработка выполнена на основе метода подавления коррозии путём снижения скорости относительной влажности воздуха в консервируемом пространстве осушенным воздухом. Выбор метода сделан из соображений достижения необходимого результата при минимальных материальных и эксплуатационных затратах, абсолютной экологической чистоте и нетоксичности технологии. Разработка может быть использована для консервации проточной части паровых турбин любого типа и мощности, независимо от состояния проточной части (отложения, эрозия, коррозия).

*Разработка и установка защиты проточной части паровых турбин Волжской ТЭЦ-1 от стояночной коррозии: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук. Л.Я. Россихин; исполн. В.А. Николаев. — Электрогорск, 1995. — 27 с. — инв. № 183/95.*

### **Разработка и внедрение акустико-механических форсунок типа ФАМ и ФМ на котлах ДКВР и ПТВМ управления тепловых и электрических сетей и котельных (ЧТЭСи К) Нововоронежской АЭС**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.Л. Гарзанов;  
исполнители: инженер И.В. Кононенко, канд. техн. наук В.П. Пикалов (от НИИХИММАШ), инженеры А.В. Усов, О.А. Капустина*

Разработаны, изготовлены и испытаны на пневмогидравлическом стенде ЭНИС комплекты форсунок ФАМ-250 для котлов ДКВР-6,5/13 (12 шт.), ФАМ-400 для котлов ДКВР-10/13 (12 шт.) и ФМ-700 для котлов ПТВМ-30М (12 шт.) котельных Нововоронежской АЭС. Проведены теплотехнические испытания паровых котлов ДКВР-10/13 № 10-14 на форсунках типа ФАМ-400 и котла ПТВМ-30М № 18 на форсунках ФМ-700, которые показали, что данные форсунки обеспечивают надёжное и эффективное сжигание мазута. По результатам испытаний выданы режимные карты работы котлов на мазуте в рабочем диапазоне нагрузок, даны рекомендации по повышению экономичности и надёжности работы оборудования.

*Разработка и внедрение акустико-механических форсунок типа ФАМ и ФМ на котлах ДКВР и ПТВМ управления тепловых и электрических сетей и котельных (ЧТЭСи К) Нововоронежской АЭС: отчёт о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС; рук.*

*А.Л. Гарзанов; исполн.: И.В. Кононенко, В.П. Пикалов, А.В. Усов, О.А. Капустина. — Электрогорск, 1997. — 84 с. — Инв. № 187/97.*

### **Разработка и внедрение газовых горелок типа ГРФ-0,3 на тоннельной печи Семилукского огнеупорного завода (СОЗ)**

*Руководитель канд. техн. наук А.П. Гарзанов;*

*исполнители: инженеры А.В. Усов, Ю.Д. Герасимюк, О.А. Капустина, И.В. Кононенко*

Объектом разработки и исследований являются газовые горелки с регулируемым факелом типа ГРФ-0,3 (далее – ГРФ) для тоннельной печи обжига кирпича. Цель работы – разработка, государственные сертификационные и промышленные испытания газовых горелок типа ГРФ-0,3 для тоннельных обжиговых печей. Представлена разработанная конструкция газовой горелки типа ГРФ-0,3 и результаты проведенных государственных испытаний опытного образца горелки в испытательном центре горелочных устройств и газоиспользующего оборудования (ИЦ ГУГО) (г. Каменск-Шахтинский). Проведено теплотехническое испытание тоннельной обжиговой печи № 6 цеха 4 Семилукского огнеупорного завода, оснащённой изготовленными горелками. Испытание проведено при нагрузке печи 21 т/смену при содержании в обжигаемых изделиях окиси алюминия ( $Al_2O_3$ ) 62% и в установившемся температурном режиме, по результатам которых комплект горелок (20 шт.) принят в эксплуатацию и прошел государственную аттестацию. Основные параметры и показатели разработанных газовых горелок ГРФ-0,3: номинальная мощность 0,36 МВт, расход газа 40 м<sup>3</sup>/ч, давление газа 5,1 кПа, давление воздуха – 0,7 кПа, термический коэффициент полезного действия (к.п.д.) зон подготовки и обжига печи составил 41%, удельный расход условного топлива 177,4 кг у.т. на единицу. Эффективность горелок определяется лучшей организацией процесса смесеобразования газа с воздухом в сочетании с закруткой последнего. Это формирует короткий широкий факел в горелке и делает более однородным температурный режим в зоне обжига. Горелки данного типа могут применяться в тоннельных обжиговых печах, сушильных установках и топливосжигающих агрегатах другого назначения.

*Разработка и внедрение газовых горелок типа ГРФ-0,3 на тоннельной печи Семилукского огнеупорного завода (СОЗ): отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. А.П. Гарзанов; исполн.: А.В. Усов, Ю.Д. Герасимюк, О.А. Капустина, И.В. Кононенко. — Электрогорск, 1998. — 83 с. — Инв. № 9.502.*

### **Балансовое теплотехническое испытание котла ДКВр-6,5/13 ст. №1 котельной АО «Петушинский завод силикатного кирпича»**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.Л. Гарзанов;*

*исполнители: инженеры И.В. Кононенко, Ю.Д. Герасимюк, О.А. Капустина*

Объектом работы являлся паровой котел ДКВр-6,5/13 ст.№1, (регистрационный №3836, заводской №2736) котельной АО «Петушинский

завод силикатного кирпича» («ПЗСК»). Задачей работы было проведение теплотехнических балансовых испытаний котла с целью:

- наладки режимов работы котлоагрегата на трех нагрузках: 50, 75, 100% от номинальной;
- выявления величин основных тепловых потерь и изыскания методов их уменьшения или устранения;
- исследования топочного процесса, выявления недостатков в работе котла и разработка мероприятий по их устранению.

Отмечается, что для каждой нагрузки проводились 2–3 прикидочных и 1 основной опыты. Прикидочные опыты проводились для определения оптимального коэффициента избытка воздуха (по условию  $CO \leq 0,005\%$  об.). Основной опыт проводился для определения основных технико-экономических и экологических параметров работы котла при его работе с оптимальным коэффициентом избытка воздуха.

Проводится описание выполненных работ.

Сформулированы мероприятия, которые рекомендуется выполнить для обеспечения надежной и экономичной работы котла в процессе последующей его эксплуатации, в частности по оптимизации организации процесса горения и снижения удельного расхода условного топлива на единицу расхода выработанной тепловой энергии.

*Балансовое теплотехническое испытание котла ДКВр-6,5/13 ст.№1 котельной АО «Петушинский завод силикатного кирпича»: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. А.Л. Гарзанов; исполн.: И.В. Кононенко, Ю.Д. Герасимюк, О.А. Капустина. — Электрогорск, 1999. — 40 с. — Инв.№191/99.*

### **Анализ экспериментальной теплофизической базы Минатома РФ в целях её оптимизации**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.Н. Блинков; исполнители: д-р физ.-мат. наук. О.И. Мелихов, д-р техн. наук Э.А. Болтенко, канд. техн. наук И.В. Ёлкин, инженер М.В. Давыдов*

Выполнено обследование стендовой базы Минатома РФ. Рассмотрено состояние экспериментальной базы предприятий ОКБ ГП, РНЦ КИ, ОКБМ, НИТИ, НИКИЭТ, ГНЦ РФ ФЭИ, ЭНИЦ, относящейся к гражданской тематике применительно к АЭС с ВВЭР и РБМК. Выполнен анализ состояния и пригодности стендов на основе экспертных оценок и с учётом материалов, представленных организациями. На основе проведённого анализа сделано заключение о современном состоянии теплофизической стендовой базы Минатома РФ и её способности обеспечить возможность проведения экспериментальных работ по обоснованию безопасности АЭС с ВВЭР и РБМК и отработке новых конструктивных решений. Выработаны рекомендации по оптимальному использованию теплофизической стендовой базы Минатома РФ.

*Анализ экспериментальной теплофизической базы Минатома РФ в целях её оптимизации: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.Н. Блинков; исполн.: О.И. Мелихов, Э.А. Болтенко, И.В. Ёлкин, М.В. Давыдов. — Электрогорск, 2000. — 72 с. — Инв. № 13.359.*

# НИОКР ЭНИЦ ВНИИАЭС–ОАО «ЭНИЦ» 2001–2010 гг.

## Работы применительно к ВВЭР

Исследования на крупномасштабном интегральном теплофизическом стенде ПСБ-ВВЭР. Ввод в эксплуатацию стенда ознаменовал принципиально новый этап работ по безопасности в нашей стране. Впервые в России был создан стенд, моделирующий реакторную установку ВВЭР, являющуюся магистральным направлением развития российской ядерной энергетики. По масштабу, уровню моделирования, качеству системы контроля и управления и автоматизированной системы сбора научной информации стенд ПСБ-ВВЭР стал в один ряд с лучшими зарубежными стендами ВЕТНСУ, LOBI, LSTF и др.

Основная цель экспериментов на ПСБ-ВВЭР – получение опытных данных, необходимых для верификации расчетных кодов, используемых для детерминистского анализа безопасности АЭС с ВВЭР, применительно к условиям проектных и запроектных аварий, при наличии процедур управления, с учетом работы новых пассивных систем безопасности. Такая верификация кодов является необходимым условием их аттестации для проведения расчетных работ, как по лицензированию энергоблоков новых проектов, так и при продлении сроков эксплуатации действующих. Ниже представлены основные эксперименты, выполненные на стенде ПСБ ВВЭР:

### **Разработка и исследование работоспособности имитаторов твэл для ПСБ ВВЭР**

*Руководитель темы д-р техн. наук Э.А. Болтенко;*

*исполнители: канд. техн. наук А.С. Зуйков, инженеры С.В. Зевалкин, И.Л. Тимофеев, техники Ю.А. Полякова, Ю.М. Логинова*

Представлены данные о различных конструкциях имитаторов твэл с косвенным нагревом, используемых при исследовании различных аварийных режимов. В настоящее время наиболее часто используется конструкция имитатора твэл косвенного нагрева, в которой в качестве электроизолирующего материала используется периклаз — MgO. Термопары размещаются в пространстве между внутренним электродом и вогнутой поверхностью оболочки. Приведены результаты испытаний имитаторов твэл конструкции ОАО «Машзавод» и ГНЦ РФ ФЭИ. Показано, что конструкция имитатора с двойной оболочкой более работоспособна по сравнению с традиционной используемой. Приведены результаты испытаний имитаторов твэл, предназначенных для исследования аварийных режимов, соответствующих номинальному и остаточному уровню тепловыделения твэл ВВЭР-1000.

Приведено описание системы контроля работоспособности имитаторов твэл, работающих в составе сборки.

*Разработка и исследование работоспособности имитаторов твэл для ПСБ ВВЭР: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Э.А. Болтенко; исполн.: А.С. Зуйков, С.В. Зевалкин, И.Л. Тимофеев, Ю.А. Полякова, Ю.М. Логинова. — Электрогорск, 2001. — 89 с. — Инв. № 150.620.*

### **Расчетно-аналитическое исследование влияния параметров импульсных линий на динамические характеристики измерительных систем**

*Исполнитель канд. техн. наук А.П. Прошутинский*

В ЭНИЦ на экспериментальных стендах широко используются измерительные преобразователи разности давлений типа ДРЕ 003 и Сапфир-22М-ДД. Измерительные преобразователи подключаются к объекту измерения с помощью импульсных линий. Динамические характеристики измерительных преобразователей с импульсными линиями определяются статическими и динамическими характеристиками преобразователей, длиной и внутренним диаметром импульсных линий, параметрами заполняющей среды. Наличие импульсных линий приводит к существенному ухудшению динамических характеристик измерительной системы в целом. В работе представлены результаты расчетно-аналитического исследования влияния параметров импульсных линий на динамические характеристики измерительных систем с измерительными преобразователями типа ДРЕ 003 и Сапфир-22М-ДД, сформированы рекомендации и требования к импульсным линиям с точки зрения уменьшения динамической погрешности измерений.

*Расчетно-аналитическое исследование влияния параметров импульсных линий на динамические характеристики измерительных систем: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; исполн. А.П. Прошутинский. — Электрогорск, 2001. — 39 с. — Инв. № 2.573.*

### **Оценки тепловых потерь стенда ПСБ ВВЭР**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: инженер Г.И. Дрёмин, канд. техн. наук И.А. Липатов*

Приведены оценки тепловых потерь как всего стенда ПСБ-ВВЭР, так и основных его компонентов. Значения тепловых потерь получены при обработке данных двенадцати экспериментов, выполненных на стенде ПСБ-ВВЭР в 1999 году. Анализ проведен для конфигурации холодных трубопроводов, включающих байпасы насосов. Полученные оценки тепловых потерь характерны для стационарного состояния с установившейся однофазной естественной циркуляцией в первом контуре и номинальными параметрами теплоносителя. Достоверность полученных оценок как суммарных потерь, так и потерь отдельных компонентов, подтверждается результатами анализа экспериментальных данных и расчетов с применением кодов.

*Оценки тепловых потерь стенда ПСБ ВВЭР: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: Г.И. Дрёмин, И.А. Липатов. — Электрогорск, 2001. — 30 с. — Инв. № 2.530.*

### **Система измерений стенда ПСБ ВВЭР**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнители: инженер Г.И. Дрёмин, канд. техн. наук И.А. Липатов,  
инженеры С.А. Галчанская, А.И. Антонова*

Представлена характеристика системы измерений стенда ПСБ-ВВЭР как совокупности измерительных каналов, включающих в себя первичные и вторичные преобразователи различных типов и обеспечивающих измерение физических параметров во время экспериментов и выдачу информации о состоянии оборудования стенда на щит оператора и в автоматизированную систему контроля и управления. Дано детальное описание размещения датчиков на различных элементах оборудования и в технологических системах стенда. Приведена характеристика основных первичных преобразователей, используемых для измерения физических величин. Представлены основные типы измерительных каналов, проанализированы их инструментальные погрешности. Предложена методика и сделаны оценки погрешности косвенных измерений, таких, как определение массового расхода с помощью сужающих устройств или определение положения весового уровня с помощью измерения разности давлений. Предложенная методика реализована в виде программы для оценки погрешности косвенных измерений с использованием текущих значений измеряемых параметров. Представлен перечень измерительных каналов с указанием типов датчиков и пределов измерений.

*Система измерений стенда ПСБ ВВЭР: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: Г.И. Дрёмин, И.А. Липатов, С.А. Галчанская, А.И. Антонова. — Электрогорск, 2001. — 94 с. — Инв. № 2.576.*

### **11% течь из «холодного» трубопровода. Пост-тест расчет комплексом ТРАП»**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнители: канд. техн. наук И.А. Липатов, инженер А.С. Молошников;  
от ОКБ «ГИДРОПРЕСС»: канд. техн. наук Ю.А. Безруков, С.И. Зайцев*

В работе приведены результаты пост-тест расчета комплексом ТРАП эксперимента, выполненного на стенде ПСБ-ВВЭР, имитирующего аварийный режим в реакторной установке ВВЭР-1000 с 11% течью теплоносителя из «холодного» трубопровода аварийной петли. В расчете воспроизведены средствами комплекса ТРАП основные процессы, важные для анализа безопасности реакторной установки: истечение теплоносителя, объемное вскипание теплоносителя и спад давления в первом контуре, работа активной и пассивной системы САОЗ, разогрев активной зоны. Отмечается, что для данного режима расчет комплексом ТРАП дает консервативную оценку

параметров развития аварийного процесса, близкую экспериментальным данным, полученным на полномасштабном по высоте стенде ПСБ-ВВЭР.

*11% течь из «холодного» трубопровода. Пост-тест расчет комплексом ТРАП: отчет о НИР ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: И.А. Липатов, А.С. Молошников, Ю.А. Безруков, С.И. Зайцев. — Электрогорск, 2001. 36 с. — Инв. № 2.828.*

### **Пост-тест — расчет эксперимента «Течь 1% из холодного трубопровода с отказом двух из трех каналов системы аварийного охлаждения»**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнители: канд. техн. наук И.А. Липатов, инженеры А.В. Капустин,  
Э.Ю. Щепетильников*

Приведены результаты пост-тест расчета эксперимента ХТ-1,0-0,4 «Течь 1% из холодного трубопровода ПСБ ВВЭР с отказом двух из трех каналов системы аварийного охлаждения высокого давления». Расчет выполнен с помощью теплогидравлического кода RELAP5/MOD 3.2. Выполнена оценка точности по методике, основанной на применении быстрого преобразования Фурье (FFT). Расхождение между расчётными результатами и экспериментальными данными оценивалось с помощью FFT-метода. Точность расчёта удовлетворяет условиям данного метода, что квалифицирует результаты расчёта как приемлемые для верификации. Путём сравнения результатов расчёта стационарного состояния с данными эксперимента подтверждена способность кода RELAP5 адекватно описывать процессы: естественную циркуляцию однофазного теплоносителя, теплопередачу в активной зоне, теплопередачу в парогенераторе по первому и второму контурам. Из сопоставления результатов расчёта переходного процесса с экспериментальными данными можно сделать вывод об адекватности описания кодом таких процессов и явлений как: критическое истечение воды, недогретой до состояния насыщения; естественная циркуляция однофазного теплоносителя; естественная циркуляция двухфазного теплоносителя; теплообмен в парогенераторе по первому контуру.

*Пост-тест — расчет эксперимента «Течь 1% из холодного трубопровода с отказом двух из трех каналов системы аварийного охлаждения: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: И.А. Липатов, А.В. Капустин, Э.Ю. Щепетильников. — Электрогорск, 2001. — 75 с. — Инв. № 2.562.*

### **Исследование температурного состояния ТВЭЛ в условиях большой течи при работе ГЕ-2**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнители канд. техн. наук И.А. Липатов, инженер Э.Ю. Щепетильников*

В работе представлены результаты расчётной (с помощью теплогидравлических кодов ATHLET 1.2A и RELAP5/MOD3.2) разработки спецификации экспериментов с большой течью из холодного трубопровода ПСБ-ВВЭР

при наложении обесточивания и работе системы ГЕ-2. Доказана возможность выполнения на стенде ПСБ-ВВЭР представительного моделирования процессов с аварийными течами из РУ с целью экспериментального исследования влияния пассивных систем ГЕ-2 на температурный режим твэл с учётом ряда приведенных особенностей.

*Исследование температурного состояния твэл в условиях большой течи при работе ГЕ-2: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: И.А. Липатов, Э.Ю. Щепетильников. — Электрогорск, 2001. — 85 с. — Инв. № 2.574.*

### **Результаты расчетов по разработке и уточнению сценария эксперимента**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов; исполнитель канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфенов*

Представлены результаты расчетов по разработке сценария эксперимента с разрывом паропровода на участке между ПГ и БЗОК на стенде ПСБ-ВВЭР. В работе исследовано три варианта сценария:

- исходный вариант сценария;
- исходный вариант сценария с программой регулирования давления;
- исходный вариант сценария с программой регулирования давления и подачей аварийной питательной воды.

Расчеты выполнены кодом КОРСАР. Во всех вариантах расчета температура поверхности имитаторов твэл не превышает предельно допустимого значения.

*Результаты расчетов по разработке и уточнению сценария эксперимента: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. В.И. Мелихов; исполн. Ю.В. Парфенов. — Электрогорск, 2001. — 60 с. — Инв. № 13.578.*

### **Анализ аварийного режима с течью 1,3 % из первого во второй контур на стенде ПСБ-ВВЭР (эксперимент ПВ-1.3-05)**

*Руководитель работы д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов; исполнители: инженеры С.Г. Олейник, И.В. Гашенко, канд. техн. наук И.В. Ёлкин, И.А. Липатов, В.И. Гудков, инженеры Г.И. Дрёмин, С.А. Галчанская, А.В. Капустин, Ю.С. Горбунов, д-р техн. наук Э.А. Болтенко, канд. техн. наук В.О. Цой*

Представлены результаты анализа эксперимента ПВ-1.3-05 на стенде ПСБ-ВВЭР, в котором имитировалась авария с 1,3 % течью теплоносителя из первого контура во второй на АЭС с реактором ВВЭР-1000 при полном обесточивании станции. В эксперименте имитировалась процедура по управлению аварией, которая способствовала ускорению процесса расхолаживания установки. Отрицательным эффектом процедуры по управлению аварией является поступление котловой воды парогенераторов в первый контур, вследствие снижения давления первого контура ниже второго. В течение всего эксперимента в модели реактора сохранялся устойчивый уровень теплоносителя, происходило медленное расхолаживание установки,

разогрева имитаторов твэл не наблюдалось. Эксперимент был остановлен по указанию экспериментатора на 6013 с. Пост-тест анализ этого эксперимента был выполнен с помощью системного теплогидравлического кода RELAP5/MOD3.2. Достаточно хорошее совпадение результатов расчета с экспериментом позволяет заключить об адекватности выполненного расчета соответствующего аварийного режима для ВВЭР-1000 и эффективности противоаварийных мероприятий.

*Анализ аварийного режима с течью 1,3 % из первого во второй контур на стенде ПСБ-ВВЭР (эксперимент ПВ-1.3-05): отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. О.И. Мелихов; исполн.: С.Г. Олейник, И.В. Гашенко, И.В. Ёлкин и др. — Электрогорск, 2001. — 137 с. — Инв. № 2.606.*

### **Течь 4% из верхней камеры смешения с отказом насосов САОЗ высокого и низкого давления. Пост-тест расчет комплексом ТРАП**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин; исполнители: инженер А.С. Молошиников, канд. техн. наук И.А. Липатов; от ОКБ «ГИДРОПРЕСС»: канд. техн. наук Ю.А. Безруков, С.И. Зайцев*

Приведены результаты пост-тест расчета комплексом ТРАП эксперимента, выполненного на стенде ПСБ-ВВЭР, имитирующего аварийный режим в реакторной установке ВВЭР-1000 с 4% течью теплоносителя из ВКС при отказе срабатывания насосов системы САОЗ и аварийных питательных насосов. В расчете воспроизведены средствами комплекса ТРАП основные процессы и параметры, важные для анализа безопасности реакторной установки: истечение теплоносителя, объемное вскипание теплоносителя и спад давления в первом контуре, работа гидроемкостей САОЗ, разогрев активной зоны. Для данного режима расчет комплексом ТРАП дает консервативную оценку параметров развития аварийного процесса, близкую к экспериментальным данным, полученным на полномасштабном стенде ПСБ-ВВЭР

*Течь 4% из верхней камеры смешения с отказом насосов САОЗ высокого и низкого давления. Пост-тест расчет комплексом ТРАП: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: А.С. Молошиников, И.А. Липатов, Ю.А. Безруков, С.И. Зайцев. — Электрогорск, 2001. — 34 с. — Инв. № 2.605.*

### **Исследование аварийного режима с течью 11% из «холодного» трубопровода на стенде ПСБ ВВЭР (эксперимент ХТ-11-05)**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин; исполнители: канд. техн. наук И.А. Липатов, В.И. Гудков, инженеры Г.И. Дрёмин, С.А. Галчанская, С.М. Никонов, А.А. Ровнов, А.И. Антонова, Ю.С. Горбунов, А.В. Капустин*

Представлены результаты анализа эксперимента ХТ-11-05, в котором имитировалась авария с течью теплоносителя 11% из горизонтальной части «холодного» трубопровода в модели первого контура АЭС с реактором ВВЭР-1000 с наложением обесточивания АЭС. В эксперименте также имитировался отказ в срабатывании гидроемкостей САОЗ. Отмечается, что в ходе

выполнения эксперимента была показана высокая эффективность работы системы САОЗ при данной аварийной ситуации. Несмотря на то, что была задействована только одна из трех групп активной САОЗ, в течение всего времени, пока была задействована система САОЗ, наблюдалось эффективное расхолаживание модели активной зоны. Разогрев начался только после наложения дополнительного условия — окончания работы САОЗ. Результаты эксперимента могут быть использованы для анализа теплогидравлических процессов в РУ ВВЭР-1000 и верификации теплогидравлических кодов.

*Исследование аварийного режима с течью 11% из «холодного» трубопровода на стенде ПСБ ВВЭР (эксперимент ХТ-11-05): отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: И.А. Липатов, В.И. Гудков, Г.И. Дрёмин и др. — Электрогорск, 2001. — 51 с. — Инв. № 2.587.*

### **Исследование аварийного режима с течью из паропровода на стенде ПСБ-ВВЭР (эксперимент ПП-26-03)**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин; исполнители: канд. техн. наук И.А. Липатов, В.И. Гудков, инженеры Г.И. Дрёмин, С.А. Галчанская, С.М. Никонов, А.А. Ровнов, А.И. Антонова, Ю.С. Горбунов, А.В. Капустин*

Представлены результаты анализа эксперимента ПП-26-03, в котором имитировалась авария с течью теплоносителя 26% по отношению к сечению паропровода на участке между парогенератором и БЗОК в модели АЭС с реактором ВВЭР-1000. Эксперимент был выполнен в соответствии с инструкцией по ликвидации аварий (ИЛА). Результаты эксперимента показали, что в случае осуществления действий, записанных в ИЛА при данном типе аварии, установка выходит в безопасное состояние. Обнаружено асимметричное поведение петель циркуляции, оказывающее существенное влияние на механизм отвода тепла от модели активной зоны и на поведение парогенераторов. Результаты эксперимента могут быть использованы для анализа теплогидравлических процессов в РУ ВВЭР-1000, и верификации теплогидравлических кодов.

*Исследование аварийного режима с течью из паропровода на стенде ПСБ ВВЭР (эксперимент ПП-26-03): отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: И.А. Липатов, В.И. Гудков, Г.И. Дрёмин и др. — Электрогорск, 2001. — 47 с. — Инв. № 2.590.*

### **Анализ результатов реконструкции системы водопитания ПГ-4 блока № 4 Балаковской АЭС и обоснование ее внедрения на остальных парогенераторах блоков Балаковской АЭС**

*Научный руководитель работы д-р техн. наук А.Г. Агеев; руководитель работы канд. техн. наук Б.Н. Корольков; исполнители: инженер Г.Б. Кожаринова, техник К.М. Малова*

Представлен анализ результатов теплотехнических испытаний ПГ с модернизированной системой водопитания. Показано, что при номинальной

мощности блока, кратность циркуляции вблизи «горячего» коллектора в ПГ с модернизированной системой водопитания приблизительно на 40 % выше, чем в ПГ штатного исполнения, что согласуется с расчетными оценками, выполненными ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и ЭНИЦ. Характер распределения солей натрия и окислов железа качественно соответствует расчетному, что свидетельствует о правомерности физических предположений, заложенных в модель расчета распределения примесей по объему парогенератора. Визуальный осмотр состояния теплообменных поверхностей и днища указывает на уменьшение отложений шлама в исследуемых зонах модернизированного ПГ по сравнению с таковыми для ПГ штатной конструкции. Экспериментально подтверждено отсутствие захлаживания днища ПГ с модернизированной системой водопитания как в стационарном режиме, так и в режиме отключения ГЦН при работе блока на уровнях мощности 65 и 100 % номинальной. Результаты испытаний позволяют рекомендовать предложенные конструктивные решения для внедрения на остальных парогенераторах блоков Балаковской АЭС, а также на других блоках АЭС с ВВЭР-1000.

*Анализ результатов реконструкции системы водопитания ПГ-4 блока № 4 Балаковской АЭС и обновление ее внедрения на остальных парогенераторах блоков Балаковской АЭС: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук.: А.Г. Агеев, Б.Н. Корольков; исполн.: Г.Б. Кожаринова, К.М. Малова. — Электрогорск, 2001. — 57 с. — Инв. № 12.607.*

### **Расчеты кодом DRASYS/MOD3/5 suclC экспериментов № 4, № 5 на стенде БК В-213**

*Руководитель работы д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов, инженер М.В. Давыдов*

Работа выполнена в рамках НИР по верификации математической модели барботера-конденсатора отечественного расчетного контейнерного кода КУПОЛ-М.

Предметом данной работы является численное моделирование кодом DRASYS/MOD3.5 sucl C экспериментов №4 и №5, проведенных на стенде БК В-213 (ЭНИЦ) в рамках международного проекта TACIS/PHARE No.PH2.13/95. Представлены описание наборов входных данных для кодов DRASYS/MOD3.5 sucl C (GRS) и результаты расчетов экспериментов №4 и №5. В целом DRASYS хорошо воспроизвел динамику изменения параметров среды (давления и температуры) в герметичных боксах стенда до момента обратного выбивания гидрозатвора тарелки барботера-конденсатора. Поскольку в коде отсутствует модель обратного выбивания гидрозатвора, дальнейшее поведение данных параметров кодом воспроизведено не было.

*Расчеты кодом DRASYS/MOD3/5 suclC экспериментов № 4, № 5 на стенде БК В-213: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. О.И. Мелихов; исполн.: В.И. Мелихов, М.В. Давыдов. — Электрогорск, 2001. — 100 с. — Инв. № 13.582.*

## **Теплогидравлические и сепарационные испытания парогенератора ПГВ-1000, оснащённого ПДЛ с безбарботажными инерционными насадками, в период ввода в эксплуатацию блока № 1 Ростовской АЭС**

*Научный руководитель темы д-р техн. наук А.Г. Агеев; руководитель работы канд. техн. наук Б.М. Корольков; исполнители: инженеры Т.В. Карпова, Г.Б. Кожаринова, техник К.М. Малова; от ОКБ «Гидропресс»: канд. техн. наук Ю.А. Безруков, инженеры В.В. Денисов, В.В. Некрасов, В.Ф. Илюшин, В.Я. Беркович; от РоАЭС: инженеры А.И. Фёдоров, А.И. Рузаев, Е.В. Воробьёва, М.И. Лупашку, В.А. Рубцов*

Выполнены расчётные оценки экспериментальных данных применительно к сепарационным схемам парогенератора ПГВ-1000. Показано, что исключение жалюзи из сепарационной схемы ПГ улучшает его эксплуатационные характеристики и обеспечивает увеличение запаса по паропроизводительности в 1,4 раза. Использование в схеме ПГ без жалюзи погруженного дырчатого листа (ПДЛ), оснащённого безбарботажными инерционными насадками, позволяет увеличить нагрузку зеркала испарения до 0,8 м/с, а положение массового уровня над ПДЛ до 500 мм. Проведены сепарационные испытания штатного парогенератора и парогенератора, оснащённого ПДЛ с насадками, блока № 1 Волгодонской АЭС при номинальной мощности. Даны рекомендации по поддержанию величины эксплуатационного уровня воды. Показано, что применение ПДЛ с насадками в сепарационной схеме ПГ позволяет существенно увеличить диапазон допустимого изменения уровня. Намечены пути и основные направления дальнейших исследований гидродинамических и сепарационных процессов применительно к парогенераторам ПГВ-1000 и ПГВ-1500.

*Теплогидравлические и сепарационные испытания парогенератора ПГВ-1000, оснащённого ПДЛ с безбарботажными инерционными насадками, в период ввода в эксплуатацию блока № 1 Ростовской АЭС: отчёт о НИР / ЭНИУ ВНИИАЭС; рук.: А.Г. Агеев, Б.М. Корольков; исполн.: Т.В. Карпова, Г.Б. Кожаринова, К.М. Малова и др. — Электрогорск, 2001. — 107 с. — Инв. № 12.611.*

## **Модернизация погруженного дырчатого щита и системы водопитания и продувки парогенератора ПГВ-1000 с целью интенсификации циркуляции воды и уменьшения отложений шлама**

*Научный руководитель темы д-р техн. наук А.Г. Агеев; руководитель работы канд. техн. наук Б.М. Корольков; исполнители: Р.В. Васильева, инженер Г.Б. Кожаринова, техник К.М. Малова; от ОКБ «Гидропресс»: канд. техн. наук Н.Б. Трунов, инженеры В.В. Денисов, А.Ф. Никишин, Н.Н. Мирошниченко*

Разработан и реализован проект реконструкции системы раздачи питательной воды ПГВ-1000М, предусматривающий подачу части питательной воды в опускной коридор вблизи «горячего» коллектора парогенератора на

блоке № 4 Балаковской АЭС при различных значениях электрической мощности и проведены теплехимические испытания ПГ с модернизированной системой водопитания с увеличением числа точек отбора проб из объёма парогенератора. Показано, что при номинальной мощности блока кратность циркуляции вблизи «горячего» коллектора в ПГ с модернизированной системой водопитания приблизительно на 40% выше, чем в ПГ штатного исполнения. Характер распределения солей натрия и оксидов железа качественно соответствует расчётному, что свидетельствует о правомерности физических предпосылок, заложенных в модель расчёта распределения примесей по объёму парогенератора. Экспериментально подтверждено отсутствие захлаживания днища ПГ с модернизированной системой водопитания как в стационарном режиме, так и в режиме отключения ГЦН на уровне мощности 65 и 100% от номинальной мощности блока. Визуальный осмотр состояния теплообменных поверхностей и днища указывает на уменьшение отложений шлама в исследуемых зонах модернизированного ПГ по сравнению с таковыми для ПГ штатной конструкции. Проведенные теплехимические испытания, дополненные результатами визуальных осмотров внутренней поверхности ПГ и расчётных оценок, позволяют считать, что после проведенной реконструкции достигнуто увеличение кратности циркуляции и улучшение условий работы теплообменного пучка. Результаты испытаний позволяют рекомендовать предложенные конструктивные решения для внедрения на остальных парогенераторах Балаковской АЭС, а также на других блоках АЭС с ВВЭР-1000.

*Модернизация погруженного дырчатого щита и системы водопитания и продувки парогенератора ПГВ-1000 с целью интенсификации циркуляции воды и уменьшения отложений шлама: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук.: А.Г. Агеев, Б.М. Корольков; исполн.: Р.В. Васильева, Г.Б. Кожаринова, К.М. Малова и др. — Электрогорск, 2001. — 67 с. — Инв. № 12.609.*

### **Исследование гидродинамики водяного объёма применительно к разработке сепарационного блока горизонтального парогенератора для ВВЭР-1500**

*Руководитель работы д-р техн. наук А.Г. Агеев;  
исполнители: канд. техн. наук Р.В. Васильева, инженер Г.Б. Кожаринова,  
техник К.М. Малова*

Исследована гидродинамика погруженных листов с установленными на них безбарботажными насадками, позволяющими существенно увеличить паровую нагрузку зеркала испарения и повысить верхнее предельное положение массового уровня воды над погруженным листом. Исследования выполнены на полномасштабных стендах различной геометрии при рабочих давлениях парогенераторов. Получены опытные данные по гидродинамике двухфазного слоя под погруженным листом и над ним, данные по гидравлическому сопротивлению насадок и циркуляции воды через лист с насадками.

Приведены результаты исследований гидродинамики модернизированного погруженного листа с насадками в парогенераторе Хмельницкой АЭС, показавшие целесообразность их использования в сепарационной схеме парогенераторов. Исследования выполнены для насадок внутренним диаметром Ду 80 и 120 мм.

*Исследование гидродинамики водяного объёма применительно к разработке сепарационного блока горизонтального парогенератора для ВВЭР-1500: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. А.Г. Агеев; исполн.: Р.В. Васильева, Г.Б. Кожаринова, К.М. Малова. — Электрогорск, 2001. — 97 с. — Инв. № 12.585.*

### **Термическая сушка труб конденсаторов турбин**

*Руководитель канд. техн. наук Л.Я. Россихин;  
исполнитель инженер М.Г. Ретивов*

Определена технология защиты от стояночной коррозии труб конденсаторов турбин, осуществлён выбор параметров консервации и её проведения. Выполнена оценка состояния внутренней поверхности труб конденсатора турбины К-1000-60/1500-2 энергоблока №2 БалАЭС по вырезанным образцам; разработано техническое решение по консервации внутренней поверхности труб конденсатора турбин Бал АЭС методом термической сушки и консервации конденсаторов турбины энергоблока № 2 БалАЭС. По итогам испытаний разработаны рекомендации по выбору оборудования системы термической сушки (вентилятор низкого давления, электрокалорифер, воздухопроводы) для всех типов конденсаторов АЭС концерна «Росэнергоатом». Система термической сушки труб конденсаторов турбин внедрена на энергоблоках № 1-4 БалАЭС.

*Термическая сушка труб конденсаторов турбин: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Л.Я. Россихин; исполн. М.Г. Ретивов. — Электрогорск, 2001. — 47 с. — Инв. № 7.581.*

### **Развитие базы данных по эксплуатационной надежности ПГ**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Бараненко;  
исполнители: инженеры В.А. Пахорский, Н.И. Алаев, О.Е. Костюков,  
Р.С. Истомин, О.А. Беляков, Л.С. Осипова, техник Г.П. Жмыхова*

Для оценки состояния теплообменных трубок ТОТ парогенераторов АЭС с ВВЭР, подверженных отрицательному воздействию среды и других факторов (энерговыделение, распределение питательной воды по объему ПГ и т.д.), необходимо располагать информацией по дефектным и заглушённым ТОТ ПГ: о количестве, координатах, датах глушения, типах дефектов и т.д. Приведены данные эксплуатационного контроля ПГ (вихретоковый контроль, гидравлика), позволяющие выявить зоны трубчатки, содержащие наибольшее количество дефектов, а также зоны с незначительным количеством дефектов. Исходными являются данные по глушению ТОТ на третьем и четвертом блоках Нововоронежской АЭС. Результаты анализа состояния ПГ представлены в виде графиков распределений заглушенных ТОТ по

периметру и высоте коллекторов ПГ и по датам глушения. Представлены поперечные сечения ПГ с указанием мест расположения заглушенных ТОТ ПГ. Приведены описания и тексты компьютерных программ, позволяющих строить поперечные сечения ПГ с указанием нормальных, дефектных или заглушенных трубок. Изучение удельной загрязненности поверхности ТОТ ПГ говорит о корреляции значений средней удельной загрязненности, количества отмытых продуктов коррозии и количества заглушенных ТОТ ПГ. На основе данных о динамике глушения ТОТ ПГ возможен прогноз глушения ТОТ на ближайшие годы и десятилетия.

*Развитие базы данных по эксплуатационной надежности ПГ: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. В.И. Бараненко; исполн.: В.А. Пахорский, Н.И. Алаев, О.Е. Костюков, Р.С. Истомин, О.А. Беляков, Л.С. Осипова, Г.П. Жмыхова. — Электргорск, 2002. — 130 с. — Инв. № 16.635.*

### **Оценка достоверности моделирования на стенде ПСБ-ВВЭР работы РУ ВВЭР-1000 в режиме однофазной естественной циркуляции**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: канд. техн. наук И.А. Липатов, инженер Г.И. Дрёмин*

В работе анализируются экспериментальные данные, полученные на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР при моделировании переходного режима РУ ВВЭР-1000 с выбегом четырех ГЦН и переходом к однофазной естественной циркуляции. Прямое сравнение экспериментальных данных с данными, полученными на атомной станции, а также анализ безразмерных критериев подобия, характеризующих теплообмен и гидравлику в модели и в прототипе, свидетельствуют о достоверности физического моделирования на стенде ПСБ-ВВЭР как стационарных состояний с принудительной и естественной циркуляцией, так и переходного режима между этими стационарными состояниями. Это позволяет сделать вывод об обоснованности и правомерности принципов моделирования, выбранных при проектировании стенда ПСБ-ВВЭР.

*Оценка достоверности моделирования на стенде ПСБ-ВВЭР работы РУ ВВЭР-1000 в режиме однофазной естественной циркуляции: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: И.А. Липатов, Г.И. Дрёмин. — Электргорск, 2002. — 64 с. — Инв. № 3.627.*

### **Спецификация экспериментов: течь теплоносителя из «холодного» трубопровода**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: канд. техн. наук И.А. Липатов, В.И. Гудков, инженеры Г.И. Дрёмин, С.А. Галчанская, С.М. Никонов, А.А. Ровнов, А.И. Антонова, А.В. Капустин*

Представлена спецификация 19 экспериментов с течью теплоносителя из горизонтальной части «холодного» трубопровода крупномасштабной модели первого контура АЭС с реактором ВВЭР-1000 (проект В-320).

В экспериментах варьировался размер течи, начальные и граничные условия исследуемого аварийного процесса. Для каждого эксперимента приведен фактический сценарий его выполнения. Экспериментально показано, что при авариях 2,4, 11 и 16 % из ХТ САОЗ надёжно справляется с функцией аварийного расхолаживания. Разогрев верхней части имитаторов твэл происходил в экспериментах с 11 и 16 % течью с отключением активной САОЗ приблизительно через 1500 с после её отключения. Разогрев происходит несколько быстрее при 16 % течи. В результате предварительного анализа выявлено сходство протекания процессов при 11 и 16 % течах.

*Спецификация экспериментов: течь теплоносителя из «холодного» трубопровода: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: И.А. Липатов, В.И. Гудков, Г.И. Дрёмин и др. — Электрогорск, 2002. — 79 с. — Инв. № 2.626.*

### **Исследование аварийного режима с двухсторонним истечением теплоносителя**

*Руководитель темы канд. техн. наук И.В. Ёлкин; исполнители: инженер А.А. Ровнов, канд. техн. наук И.А. Липатов, инженеры Г.И. Дрёмин, С.А. Галчанская, С.М. Никонов, А.И. Антонова, А.В. Капустин*

Цель работы — исследование событий, происходящих в реакторной установке ВВЭР-1000 при аварии с двухсторонней течью теплоносителя из «горячего» трубопровода и пополнение банка экспериментальных данных для верификации теплогидравлических кодов. Эксперимент выполнен на крупномасштабном интегральном стенде ПСБ-ВВЭР. В работе представлен анализ эксперимента ГТ-2х25-02: Течь теплоносителя из «горячего» трубопровода при имитации двухстороннего истечения при разрыве течи 2х25 %.

*Исследование аварийного режима с двухсторонним истечением теплоносителя: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: А.А. Ровнов, И.А. Липатов, Г.И. Дрёмин и др. — Электрогорск, 2002. — 55 с. — Инв. № 2.632.*

### **Расчетно-экспериментальные исследования МПА для ВВЭР-1000 (проект В-320)**

*Руководитель работы д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов; исполнители: инженер И.В. Гашенко, инженер Г.В. Бычкова, канд. техн. наук И.В. Ёлкин, И.А. Липатов, С.Г. Олейник, инженер В.Ф. Таратушкин, В.Н. Меркулов*

В работе проанализированы основные признаки МПА, действия систем автоматики и персонала при проектном протекании аварии. На основании этого разработаны сценарии выполнения эксперимента на ПСБ-ВВЭР и выполнения расчетов.

Представлены результаты проведенного расчетного обоснования адекватности протекания теплогидравлических процессов на стенде ПСБ-ВВЭР и РУ ВВЭР-1000 в ходе аварии с использованием кода RELAP5/MOD3.3:

Отмечается, что количественная и качественная оценка адекватности описания кодом RELAP5/MOD3.3 эксперимента ГТ-2х25 % показала хорошее совпадение основных теплогидравлических параметров установки на всех стадиях протекания исследуемого режима.

Приведены результаты сравнительного анализа протекания данной аварии на стенде ПСБ-ВВЭР и РУ ВВЭР-1000. По результатам сравнительного анализа для РУ ВВЭР-1000 и стенда ПСБ-ВВЭР основные закономерности протекания аварии с гильотинным разрывом горячего трубопровода выполняются, Полученные результаты доказывают правомерность проведения экспериментальных исследований на стенде ПСБ-ВВЭР.

*Расчетно-экспериментальные исследования МПА для ВВЭР-1000 (проект В-320): отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. О.И. Мелихов; исполн.: И.В. Гашенко, Г.В. Бычкова, И.В. Ёлкин и др. — Электрогорск, 2002. — 224 с. — Инв. № 1.639.*

### **Теплохимические испытания парогенератора блока ВВЭР-1000 при различных вариантах системы водопитания и продувки**

*Научный руководитель темы д-р техн. наук А.Г. Агеев;  
руководитель работы канд. техн. наук Б.Н. Корольков;  
исполнители: инженер Т.В. Карпова, техник К.М. Малова;  
от «ГИДРОПРЕСС»: канд. техн. наук Н.Б. Трунов,  
инженеры А.Н. Смирнов, В.В. Денисов*

Представлены результаты анализа данных, полученных на завершающем этапе теплохимических испытаний 4ПГ-4 Балаковской АЭС с модернизированной системой водопитания с подачей части питательной воды в опускной коридор вблизи «горячего» коллектора при существующей схеме продувки. Испытания были проведены в стационарных режимах при мощности блока 100 и 87% от номинальной с целью набора статистических данных по распределению железоксидных соединений в водяном объеме и продувке парогенератора. На основании анализа полученных данных установлено, что характер распределения железа по объему ПГ и в линиях продувки аналогичен распределению солей, полученному на предыдущих этапах испытаний этого парогенератора. Максимальное содержание железа зафиксировано в зоне «холодного» торца ПГ, что соответствует известным представлениям о характере распределения солей и шлама в ПГВ-1000М в варианте с организацией «солевого» отсека в «холодном» торце парогенератора. Установлено, что результаты проведенных экспериментов качественно согласуются с результатами расчета с помощью трехмерного кода STEG. Делается заключение, что для реализации комплекса мероприятий по совершенствованию системы водопитания и продувки ПГВ-1000М, необходимо в рамках Программы работ по исследованию гидродинамики водяного объема парогенератора референтного блока ВВЭР-1000 на блоке IV Балаковской АЭС, утвержденной Техническим директором концерна «Росэнергоатом» Б.В. Антоновым 24.04.02, продолжить выполнение ра-

бот по изменению схемы и регламента продувки ПГ, как это предусмотрено Техническим решением концерна «Росэнергоатом» от 11.03.97 № 6-1-16/880.

*Теплохимические испытания парогенератора блока ВВЭР-1000 при различных вариантах системы водопитания и продувки: отчет о НИР/ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук.: А.Г. Агеев, Б.Н. Корольков; исполн.: Т.В. Карпова, К.М. Малова, Н.Б. Трунов и др. — Электрогорск, 2002. — 26 с. — Инв. № 12.640.*

### **Влияние системы гидроемкостей второй ступени на температурное состояние твэл**

*Руководитель темы канд. техн. наук И.В. Ёлкин; исполнители: инженер Е.В. Столяров, канд. техн. наук И.А. Липатов, инженер А.А. Ровнов, Г.И. Дремин, С.А. Галчанская, С.М. Никонов, А.И. Антонова, канд. техн. наук В.И. Гудков, инженеры А.В. Капустин, А.В. Басов*

В работе представлен анализ результатов выполненного на стенде ПСБ ВВЭР экспериментального исследования влияния работы системы ГЕ-2 на температурный режим оболочек имитаторов твэл. Установлено, что при проектной работе системы ГЕ-2 и мощности сборки имитаторов твэл, соответствующей остаточному тепловыделению, температурный режим оболочек имитаторов твэл поддерживается в требуемых условиях. Дано описание конфигурации стенда при выполнении эксперимента, краткое описание системы измерений, сценария, начальных и граничных условий эксперимента. На основании анализа полученных результатов даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию системы ГЕ-2.

*Влияние системы гидроемкостей второй ступени на температурное состояние твэл: отчет о НИР/ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: Е.В. Столяров, И.А. Липатов, А.А. Ровнов и др. — Электрогорск, 2002. — 104 с. — Инв. № 2.644.*

### **Исследование на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР аварийного режима с течью из холодной ветки циркуляционного трубопровода (Эксперимент ХТ-3.0-02)**

*Руководитель темы канд. техн. наук И.В. Ёлкин; исполнители: инженер Г.И. Дремин, канд. техн. наук И.А. Липатов, инженер А.А. Ровнов, С.А. Галчанская, С.М. Никонов, А.И. Антонова*

В работе представлен предварительный анализ эксперимента ХТ-3.0-02, выполненного на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР. Исходным событием аварии рассматривалась 3 % течь теплоносителя из «холодного» трубопровода на участке между насосом и опускным участком. Описываемый эксперимент выполнен по сценарию экспериментов, проведенных на четырех зарубежных интегральных установках разного масштаба: ВЕТНСУ (Франция), LSTF (Япония), SPES (Италия) и LOBI (Италия). За основу принят сценарий эксперимента VL-34 (6 % Cold Leg Break LOCA), выполненного на интегральном стенде LOBI в 1990 году. Исходное событие исследуемого

аварийного процесса — течь из трубопровода, соединяющего ГЦН с входным патрубком реактора. Развитие аварийного процесса происходит при работе двух гидроемкостей САОЗ, подсоединенных к опускному участку и трех каналов САОЗ низкого давления. Целью проведения сопоставительных экспериментов является оценка влияния степени масштабирования реакторной установки на протекание аварийных процессов и проверка способности теплогидравлических кодов правильно описывать теплогидравлические явления в разномасштабных установках. Результаты эксперимента могут быть использованы для верификации теплогидравлических кодов, ориентированных на анализ безопасности реакторных установок типа ВВЭР-1000.

Представлено краткое сопоставление результатов, полученных в экспериментах на ПСБ-ВВЭР и LOBI. Отмечается, что сравнение кривых изменения давления в первом и втором контурах, а также температуры поверхности имитаторов ТВЭЛ, свидетельствуют о том, что относительный размер течи в эксперименте на ПСБ-ВВЭР был меньше, чем на LOBI. Для более точного определения размера течи необходимо проведение компьютерного моделирования с учетом полученных экспериментальных данных.

*Исследование на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР аварийного режима с течью из холодной ветки циркуляционного трубопровода (Эксперимент ХТ-3.0-02): отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: Г.И. Дрёмин, И.А. Липатов, А.А. Ровнов и др. — Электрогорск, 2002. — 63 с. — Инв. № 2.643.*

## **Теплохимические испытания парогенератора блока ВВЭР-1000 при различных вариантах системы водопитания и продувки**

*Научный руководитель работы д-р техн. наук А.Г. Агеев; руководитель работы канд. техн. наук Б.М. Корольков; исполнители: канд. техн. наук Н.Б. Трунов, инженеры А.Н. Смирнов, В.В. Денисов, Г.Б. Кожаринова, техник К.М. Малова*

Проведен завершающий этап теплохимических испытаний 4ПГ-4 Балаковской АЭС с модернизированной системой водопитания и подачей части питательной воды в опускной коридор вблизи «горячего» коллектора при существующей схеме продувки. Испытания проведены на стационарных режимах при мощности блока 100 и 87% от номинальных с целью получения данных по распределению железооксидных соединений в водяном объеме и линиях продувки парогенератора. Установлено, что характер распределения железа по объему ПГ и в линиях продувки аналогичен распределению солей, полученному на предыдущих этапах испытаний. Максимальное содержание железа зафиксировано в зоне «холодного» торца ПГ, что соответствует представлениям о характере распределения солей и шлама в ПГВ-1000М в варианте с организацией «солевого» отсека в «холодном» торце парогенератора. Результаты выполненных экспериментов качественно согласуются с

результатами расчёта с помощью трёхмерного кода STEG, разработанного в ФГУП «ЭНИЦ».

*Теплохимические испытания парогенератора блока ВВЭР-1000 при различных вариантах системы водопитания и продувки: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук.: А.Г. Агеев, Б.М. Корольков; исполн.: Н.Б. Трунов, А.Н. Смирнов, В.В. Денисов и др. — Электрогорск, 2002. — 23 с. — Инв. № 12.622.*

### **Расчёт эрозионно-коррозионного износа элементов трубопроводов АЭС с двухфазной средой с помощью программного средства ЭКИ-03**

*Руководитель д-р техн. наук В.И. Бараненко; исполнители: инженеры Н.И. Алаев, В.Н. Меркушев, Р.С. Истомин; от ФГУП ВНИИАЭС канд. техн. наук М.Б. Бакиров, Ю.А. Янченко, инженеры С.Ф. Ерпылева, В.А. Пахорский*

Создано программное средство (ПС) для расчёта интенсивности ЭКИ трубопроводов второго контура, изготовленных из сталей перлитного класса, с двухфазной средой на АЭС с ВВЭР-440. Влияние параметров на интенсивность ЭКИ в ПС определяется с помощью эмпирических корреляций, полученных на основе обработки результатов лабораторных исследований, анализа данных эксплуатационного контроля и в соответствии с имеющимися в литературных источниках рекомендациями. Диапазоны изменения параметров выбраны из соображений, определяемых условиями эксплуатации АЭС с ВВЭР-440. Проверка разработанного ПС производилась на основе данных эксплуатационного контроля, проводимого на АЭС. Разработанное ПС позволяет рассчитать скорость ЭКИ в начальный и конечный моменты временного интервала, среднюю скорость ЭКИ в заданном временном интервале, а также утонение стенки трубопровода в течение этого интервала.

*Расчёт эрозионно-коррозионного износа элементов трубопроводов АЭС с двухфазной средой с помощью программного средства ЭКИ-03: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Бараненко; исполн.: Н.И. Алаев, В.Н. Меркушев, Р.С. Истомин и др. — Электрогорск, 2002. — 142 с. — Инв. № 16.631.*

### **Оценка достоверности моделирования на стенде ПСБ-ВВЭР работы РУ ВВЭР-1000 в режиме однофазной естественной циркуляции**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин; исполнители: канд. техн. наук И.А. Липатов, инженер Г.И. Дрёмин*

В работе анализируются экспериментальные данные, полученные на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР при моделировании переходного режима РУ ВВЭР-1000 с выбегом четырех ГЦН и переходом к однофазной естественной циркуляции. Прямое сравнение экспериментальных данных с данными, полученными на атомной станции, а также анализ безразмерных критериев подобия, характеризующих теплообмен и гидравлику в модели и в прототипе, свидетельствуют о достоверности физического моделирования на стенде ПСБ-ВВЭР как стационарных состояний с принудительной и

естественной циркуляцией, так и переходного режима между этими стационарными состояниями. Это позволяет сделать вывод об обоснованности и правомерности принципов моделирования, выбранных при проектировании стенда ПСБ-ВВЭР.

*Оценка достоверности моделирования на стенде ПСБ-ВВЭР работы РУ ВВЭР-1000 в режиме однофазной естественной циркуляции: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: И.А. Липатов, Г.И. Дрёмин. — Электрогорск, 2002. — 64 с. — Инв. № 3.627.*

### **Определение влияния количества и состава отложений продуктов коррозии, химотмывок, уровня режимных параметров, условий эксплуатации, химсостава конструкционных материалов на повреждаемость ТОТ ПГ**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Бараненко; исполнители: инженеры О.А. Беляков, О.Е. Костюков*

В работе представлены результаты исследования влияния количества и состава отложений продуктов коррозии, химотмывок, уровня режимных параметров, условий эксплуатации, химсостава конструкционных материалов на повреждаемость ТОТ ПГ на АЭС с ВВЭР, которые позволяют сделать вывод о том, что эксплуатационная надежность ПГ в значительной степени зависит от выбора материала теплообменных труб парогенераторов. Меньшее влияние на повреждаемость ТОТ ПГ оказывают значения показателей ВХР.

Приведены данные исследования влияния содержания химических элементов на коррозионные свойства сталей. Характеристики конструкционных материалов определяются в основном наличием никеля и хрома. Влияние никеля на коррозионное растрескивание аустенитных нержавеющей сплавов неоднозначно. Коррозионные свойства материалов зависят также от других элементов (примесей) и от отношений концентраций, — например, отношения содержания титана к содержанию углерода. Отмечается, что изучение статистики отложений на трубчатке ПГ и статистики глушения ТОТ на блоках 3 и 4 НВАЭС выявило обратную пропорциональность между средней удельной загрязненностью ТОТ ПГ и количеством заглушенных ТОТ. Аналогичная закономерность была установлена на АЭС ПАКШ. На АЭС Nord повреждение ТОТ ПГ произошло вследствие роста концентрации хлоридов в теплоносителе и наличия медьсодержащего оборудования во втором контуре. Предложены перспективные конструкционные материалы ТОТ ПГ АЭС с ВВЭР (стали марок 03X21H32M3Б, 08X14MФ, 015X18M2Б, 04X25H6M3Б). Данные материалы обладают приемлемыми механическими и теплофизическими свойствами, высокой стойкостью против коррозионного растрескивания. Несмотря на значительную стоимость, данные материалы могут быть использованы в конструкциях новых ПГ, поскольку они

по основным показателям превосходят материалы ТОТ ПГ АЭС с ВВЭР, используемые в настоящее время.

*Определение влияния количества и состава отложений продуктов коррозии, химотмывок, уровня режимных параметров, условий эксплуатации, химсостава конструкционных материалов на повреждаемость ТОТ ПГ: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Бараненко, исполн.: О.А. Беляков, О.Е. Костюков. — Электрогорск, 2003. — 53 с. — Инв. № 16.691.*

### **Экспериментальное исследование эффективности антидебризных фильтров кассет ВВЭР-440**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.А. Гашенко; исполнители: инженер В.С. Курсков, инженеры О.Н. Абакумова, В.Г. Швеи, канд. техн. наук В.Д. Локтионов, канд. физ.-мат. наук В.Р. Цой; от ОАО «МСЗ»: инженеры А.В. Иванов, В.М. Кочергин*

Проведено экспериментальное исследование антидебризных фильтров кассет ВВЭР-440 по отношению к дебризным частицам различной конфигурации из различных материалов на специально созданном стенде. Проведены испытания антидебризного фильтра, установленного в нижней части укороченного макета штатной ТВС, при расходе теплоносителя до 130 м<sup>3</sup>/ч и температуре 25 °С. Исследованию подлежали антидебризные фильтры с размерами в свете 1,15; 1,5; 2,0; 3,0 и 4,0 мм, изготовленные ОАО «МСЗ». При проведении экспериментов был использован дебриз разных геометрических размеров и из различного материала, наиболее часто присутствующий в основных технологических контурах в реальных реакторных установках.

*Экспериментальное исследование эффективности антидебризных фильтров кассет ВВЭР-440: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.А. Гашенко; исполн.: В.С. Курсков, О.Н. Абакумова, В.Г. Швеи и др. — Электрогорск, 2003. — 87 с. — Инв. № 4.688.*

### **Разработка и ведение базы данных по повреждаемости теплообменных труб парогенераторов энергоблоков АЭС с ВВЭР-440 первого поколения**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Бараненко; исполнители: инженеры О.А. Беляков, О.Е. Костюков*

Объект исследования — парогенераторы на АЭС с ВВЭР. Цель работы — определение закономерностей повреждения теплообменных труб парогенераторов (ТОТ ПГ), разработка и использование вероятностных методов расчета и прогнозирования дефектных и заглушенных теплообменных труб парогенераторов, разработка мероприятий по повышению эксплуатационной надежности ТОТ ПГ и парогенераторов в целом. Метод исследования — анализ данных вихретокового контроля, контроля удельной загрязненности, данных по составу отложений продуктов коррозии материалов ПГ, изучение влияния отложений на повреждаемость ТОТ ПГ. Анализ расположения дефектов на свободной поверхности ТОТ ПГ и под

дистанционирующими решетками, наличия и влияния застойных зон в объеме парогенератора на расположение повреждения ТОТ ПГ. Приведены результаты комплексного исследования, включающего анализ расположения дефектных и заглушенных ТОТ в различных зонах парогенераторов, влияние удельной загрязненности и наличия застойных зон на повреждения ТОТ, расчет и прогнозирование количества заглушенных ТОТ ПГ на период эксплуатации до 45 лет, разработку перечня мероприятий, внедрение которых должно способствовать повышению эксплуатационной надежности парогенераторов. Отмечается, что внедрение полученных результатов должно способствовать повышению КИУМ энергоблоков АЭС с ВВЭР.

*Разработка и ведение базы данных по повреждаемости теплообменных труб парогенераторов энергоблоков АЭС с ВВЭР-440 первого поколения: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Бараненко; исполн.: О.А. Беляков, О.Е. Костюков. — Электргорск, 2003. — 53 с. — Инв. № 16.694.*

### **Верификация и обоснование программного средства ЭКИ-02. Расчет эрозионно-коррозионного износа трубопроводов АЭС**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Бараненко; исполнители: инженер Н.И. Алаев, инженеры В.Н. Меркушев, Р.С. Истомин, Л.С. Осипова; от ОАО ВНИИАЭС канд. техн. наук М.Б. Бакиров, Ю.А. Янченко, инженер С.Ф. Ерпылева, В.Д. Пахорский*

Цель работы — создание первого в РФ программного средства (ПС) по расчету скорости эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) трубопроводов второго контура АЭС с ВВЭР-440, выполненных из перлитных сталей. Отмечается, что влияние параметров на скорость ЭКИ в ПС определяется с помощью эмпирических корреляций, полученных на основе обработки результатов лабораторных исследований, анализа данных эксплуатационного контроля и в соответствии с имеющимися в литературных источниках рекомендациями. Диапазоны изменения параметров выбраны из соображений, определяемых условиями эксплуатации АЭС с ВВЭР-440. Вывод эмпирических зависимостей для определения значений параметров в ПС проведен таким образом, чтобы расчетное значение скорости ЭКИ было максимальным для данного набора параметров. Представленное к аттестации ПС позволяет рассчитать скорость ЭКИ в начальный и конечный моменты временного интервала, среднюю скорость ЭКИ в заданном временном интервале, а также утонение стенки трубопровода в течение этого интервала. По тематике расчетов ПС ЭКИ-02 предназначено для управления ресурсом элементов трубопроводов, изготовленных из сталей перлитного класса.

*Верификация и обоснование программного средства ЭКИ-2. Расчет эрозионно-коррозионного износа трубопроводов АЭС: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Бараненко, исполн.: Н.И. Алаев, В.Н. Меркушев, Р.С. Истомин и др. — Электргорск, 2003. — 72 с. — Инв. № 16.653.*

## **Разработка технических требований на химическую и радиохимические лаборатории (STG10, SRG10, SRG50) для АЭС «Куданкулам»**

*Руководитель работы канд. техн. наук С.Г. Олейник;*

*исполнители: инженеры А.Р. Преловский, В.В. Вдовин, Н.М. Подволоцкая, В.А. Тюняев*

Представлены описания разработанных технических требований на химическую и радиохимические лаборатории (STG10, SRG10, SRG50) для АЭС «Куданкулам», в том числе требования к проектированию, материалам, изготовлению и обеспечению лабораторий, к поставляемому оборудованию и приборам. Определен объем и основные методы контроля, произведен выбор основных типов приборов и оборудования. По результатам разработки технических требований представлены основные технические характеристики приборов и оборудования.

*Разработка технических требований на химическую и радиохимические лаборатории (STG10, SRG10, SRG50) для АЭС «Куданкулам»: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. С.Г. Олейник; исполн.: А.Р. Преловский, В.В. Вдовин, Н.М. Подволоцкая, В.А. Тюняев. — Электрогорск, 2003. — 136 с. — Инв. № 11.658.*

## **Опыт эксплуатации тепловыделяющей сборки ТВС 2 установки ПСБ ВВЭР**

*Руководитель работы д-р техн. наук Э.А. Болтенко;*

*исполнители: инженеры Н.В. Захаров, канд. техн. наук И.В. Ёлкин, канд. физ.-мат. наук В.Д. Локтионов, инженеры И.Л. Тимофеев, Н.Н. Киринов, С.С. Сергеева, В.С. Григорян; от ОАО «Машзавод» инженер Ю.Н. Бабенко*

Представлено описание основных конструктивных элементов тепловыделяющей сборки ТВС 2 (мощность 1,5 МВт), сформированной из имитаторов ТВЭЛ конструкции ОАО «Машзавод». Приведен перечень пусков, проведенных на установке ПСБ ВВЭР с указанием температурных режимов ТВС2. В общей сложности ТВС2 проработала 1392 часа, выполнено 19 пусков. Приведены оценки температурных режимов работы имитаторов:

- температурный режим имитаторов в номинальном режиме (мощность ТВС2=1,5 МВт, Р=16,0 МПа) следующий: температура оболочки – 350÷360 °С, перепад температур в периклазе – 200÷400 °С, максимальная температура в центре внутреннего электрода – 750÷950 °С;
- температурный режим имитаторов для режимов с частичным запариванием и разогревом ТВС2: температура оболочки – 960 °С, перепад температур в периклазе – 30÷60 °С, максимальная температура в центре внутреннего электрода – 990÷1120 °С.

Приведены данные анализа факторов, приведших к выходу ТВС2 из строя. Рассмотрены предполагаемые схемы деформирования и разрушения имитаторов, а именно при эксплуатации пучка на рабочих режимах

происходило температурное удлинение имитаторов твэл, компенсацию которых не обеспечивали узлы уплотнения нижнего фланца. Это приводило к возникновению дополнительных сил, действующих на имитаторы и приводящих к их изгибу вследствие потери устойчивости. Анализируются основные факторы, приведшие к потере устойчивости оболочек имитаторов:

- высокие температуры оболочек, при которых имели место упругопластические деформации оболочек имитаторов;
- неравномерность температур оболочек по периметру, обусловленная как их касанием, так и возможным неравномерным характером теплосъема с оболочек при запаривании и последующем охлаждении;
- отсутствие свободного перемещения имитаторов относительно дистанционирующих решеток и резиновых уплотнений, а также мест прохода имитаторов в узлах герметизации (фланцы). Предлагаются мероприятия по обеспечению надежности имитаторов ТВС.

*Опыт эксплуатации тепловыделяющей сборки ТВС 2 установки ПСБ ВВЭР: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Э.А. Болтенко; исполн.: Н.В. Захаров, И.В. Ёлкин, В.Д. Локтионов и др. — Электрогорск, 2003. — 47 с. — Инв. № 6.656.*

### **Исследование процесса расхолаживания реакторной установки в условиях потери всех источников переменного тока**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: инженер С.М. Никонов, канд. техн. наук И.А. Липатов, инженеры Г.И. Дрёмин, А.А. Ровнов, А.И. Антонова, канд. техн. наук В.И. Гудков*

Представлены результаты анализа эксперимента РУ-0,4-01, выполненного на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР, в котором исследовались теплогидравлические процессы в модели первого контура реакторной установки ВВЭР-1000 в процессе ее расхолаживания во время останова в условиях потери всех источников переменного тока. Из анализов результатов эксперимента следует, что исследуемый процесс имеет пять характерных стадий:

- рост давления во втором контуре;
- выпаривание воды второго контура из парогенераторов (работа системы БРУ-А);
- разогрев теплоносителя первого контура и заполнение полностью КД;
- периодическое истечение теплоносителя первого контура через клапан ИПУ КД;
- обезвоживание модели активной зоны и разогрев поверхности имитаторов твэл.

Установлено, что разогрев поверхности имитаторов твэл наступил на 12500 с, при сохранении в первом контуре значительного количества теплоносителя, сосредоточенного в компенсаторе давления и холодных трубопроводах, а давление в первом контуре не снижается до уставки сра-

батывания штатных гидроемкостей САОЗ, вследствие чего необходимо предпринять меры по организации подачи воды в первый контур от гидроемкостей САОЗ – снизив давление в первом контуре при помощи системы аварийного газоудаления или открытием одного рабочего клапана ИПУ КД.

*Исследование процесса расхолаживания реакторной установки в условиях потери всех источников переменного тока: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: С.М. Никонов, И.А. Липатов, Г.И. Дрёмин и др. — Электрогорск, 2004. — 61 с. — Инв. № 2.701.*

### **Система измерений стенда ПСБ ВВЭР**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин; исполнители: Г.И. Дрёмин, канд. техн. наук И.А. Липатов, инженер А.И. Антонова*

В работе представлена характеристика системы измерения стенда ПСБ-ВВЭР как совокупности измерительных каналов, включающих в себя первичные и вторичные преобразователи различных типов, обеспечивающие измерение физических параметров во время экспериментов, а также выдачу информации о состоянии оборудования стенда на щит оператора и в автоматизированную систему контроля и управления. Дано детальное описание размещения датчиков на различных элементах оборудования и в технологических системах стенда. Приведена характеристика основных первичных преобразователей, используемых для измерения физических величин. Представлены основные типы измерительных каналов, проанализированы их инструментальные погрешности. Предложена методика и сделаны оценки погрешностей косвенных измерений, таких как: определение массового расхода с помощью сужающих устройств или определение положения весового уровня с помощью измерения разности давлений. Отмечается, что предложенная методика реализована в виде программы для оценки погрешности косвенных измерений с использованием текущих значений измеряемых параметров.

*Система измерений стенда ПСБ ВВЭР: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: Г.И. Дрёмин, И.А. Липатов, А.И. Антонова. — Электрогорск, 2004. — 104 с. — Инв. № 2.711.*

### **Комплексные исследования стационарных и переходных режимов парогенераторов ПГВ-1000**

*Руководитель работы д-р техн. наук А.Г. Агеев; исполнители: канд. техн. наук Р.В. Васильева, инженеры Ю.С. Горбунов, Т.Б. Подволоцкая*

Объектом исследования является парогенератор ПГВ-1000 блока 1 Хмельницкой АЭС. Цель работы – исследование распределения температур пароводяной смеси и поверхности нагрева теплообменных труб при стационарных и переходных режимах работы парогенератора, динамические испытания системы автоматического регулирования уровня в парогенераторе

в режимах нормальной эксплуатации. Динамические испытания выполнены при сбросе нагрузки, отключении ПТН, отключении ГЦН. Отмечается, что для исследования распределения температур парогенератор в зонах измерения оснащен специально установленными термодатчиками, при динамических испытаниях использовалась штатная контрольно-измерительная аппаратура. Представлены полученные опытные данные, подтверждающие нормальные эксплуатационные характеристики парогенератора, как в стационарных, так и в динамических режимах. Исследования выполнены в диапазоне изменения тепловой мощности парогенератора от 375 МВт до 750 МВт. Результаты исследования могут быть использованы при модернизации системы водопитания и системы регулирования уровня в парогенераторах энергоблоков с ВВЭР-1000. При модернизации системы регулирования уровня парогенератора в качестве одного из сигналов, поступающих в систему регулирования, целесообразно использовать сигнал по расходу генерируемого пара.

*Комплексные исследования стационарных и переходных режимов парогенераторов ПГВ-1000: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. А.Г. Агеев; исполн.: Р.В. Васильева, Ю.С. Горбунов, Т.Б. Подволоцкая. — Электрогорск, 2004. — 47 с. — Инв. № 2.706.*

### **Подготовка, проведение и анализ результатов сепарационных испытаний модернизированного парогенератора ПГВ-1000 I блока Волгодонской АЭС**

*Руководитель работы доктор техн. наук А.Г. Агеев;  
исполнители: канд. техн. наук Р.В. Васильева,  
канд. техн. наук Б.М. Корольков, инженеры Ю.С. Горбунов,  
Т.Б. Подволоцкая*

Приведены результаты сепарационных испытаний штатного парогенератора и парогенератора, оснащенного погруженным листом с насадками, блока I Волгодонской АЭС при номинальной мощности. Цель работы — исследование модернизированной сепарационной схемы парогенератора с погруженным листом, снабженным безбарботажными насадками, улучшающей эксплуатационные характеристики ПГ и обеспечивающей запас по паропроизводительности. Метод проведения работы — исследование сепарационных характеристик модернизированного ПГ и сравнение полученных данных с результатами, полученными на референтном парогенераторе I блока Волгодонской АЭС. Область применения полученных результатов — парогенераторы ПГВ-1000 и ПГВ-1500 энергоблоков АЭС с ВВЭР.

*Подготовка, проведение и анализ результатов сепарационных испытаний модернизированного парогенератора ПГВ-1000 I блока Волгодонской АЭС: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. А.Г. Агеев; исполн.: Р.В. Васильева, Б.М. Корольков, Ю.С. Горбунов, Т.Б. Подволоцкая. — Электрогорск, 2004. — 72 с. — Инв. № 2.707.*

**Пост-тестовый анализ и основные результаты эксперимента на стенде БК/В-213 по экспериментальной квалификации барботажно-вакуумной локализирующей системы безопасности 3-го энергоблока Кольской АЭС**  
*Исполнители: канд. техн. наук В.И. Мелихов, инженеры М.В. Давыдов, А.В. Соколин*

Выполнен пост-тестовый анализ экспериментов, выполненных на крупномасштабном стенде БК/В-213, созданном для экспериментальной квалификации барботажно-вакуумной локализирующей системы безопасности АЭС с реактором ВВЭР-440/В-213, применительно к энергоблоку № 3 Кольской АЭС, характеризующемуся специфическими особенностями системы локализации аварий. Основной целью пост-тестового анализа экспериментов, выполненных на стенде БК/В-213, являлась валидация контейментного теплогидравлического кода COCOSYS, предназначенного для моделирования термогидравлических процессов в системах герметичных помещений и барботёре-конденсаторе.

*Пост-тестовый анализ и основные результаты эксперимента на стенде БК/В-213 по экспериментальной квалификации барботажно-вакуумной локализирующей системы безопасности 3-го энергоблока Кольской АЭС: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; исполн.: В.И. Мелихов, М.В. Давыдов, А.В. Соколин. — Электрогорск, 2004. — 165 с. — Инв. № 13.820.*

**Исследование режима естественной циркуляции теплоносителя при последовательном уменьшении его массы в первом контуре ИСБ-ВВЭР**

*Руководитель темы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;  
 руководитель работы канд. техн. наук М.П. Гашенко;  
 исполнители: инженеры И.В. Гашенко, А.В. Басов, З.А. Лебедева,  
 техник Г.А. Пуняева*

Целью работы являлось расчетно-экспериментальное исследование теплогидравлических процессов в режиме естественной циркуляции (ЕЦ) теплоносителя в первом контуре при пошаговом уменьшении его массы, выполненное на интегральном теплофизическом стенде ИСБ-ВВЭР с двумя конфигурациями теплообменной поверхности парогенераторов и верификация кода RELAP/MOD3.2 по результатам экспериментального исследования. Работа выполнена в рамках контракта с OECD. В работе представлены:

- описание стенда и системы измерений;
- методика проведения экспериментов с двумя различными конфигурациями теплообменной поверхности парогенераторов (ПГ);
- методика определения массы теплоносителя в первом контуре;
- начальные, граничные условия и сценарии экспериментов;
- анализ результатов экспериментов и сравнение теплогидравлических процессов в них;

- анализ и сравнение результатов посттестовых расчетов, выполненных с помощью кода RELAP/MOD3.2 и экспериментальных данных.

Отмечается, что:

- Методика выполнения, сценарий и начальные условия экспериментов с ЕЦ теплоносителя при разной конфигурации ПГ были одинаковыми. Ступенчатое снижение массы теплоносителя в контуре и поддержание ее неизменной в течение 1000 с позволили идентифицировать в контуре ИСБ-ВВЭР такие теплогидравлические явления, как естественная циркуляция одно- и двухфазного теплоносителя, конденсация пара в ПГ, противоточное движение конденсата пара и ограничение его перемещения потоком восходящего пара, нормальная и ухудшенная теплоотдача от имитаторов ТВЭЛ, теплопередача из первого контура во второй в ПГ, прорыв пара через гидрозатворы петель и частичная очистка их от воды, а также зафиксировать граничные значения массы теплоносителя, при которых эти явления происходили.
- Характер протекания и хронология теплогидравлических процессов, а также количество теплоносителя в первом контуре в экспериментах с разной конфигурацией ПГ идентичны до нарушения теплообмена в активной зоне (АЗ). В период ухудшенного теплообмена АЗ проявилось влияние разных геометрических характеристик моделей ПГ.
- Особенностью обоих экспериментов являлись значительные периодические пульсации параметров (давления, перепадов давления, расхода, температуры), характеризующие процесс конденсации пара в ПГ.
- Сравнение расчетных и экспериментальных данных экспериментов с моделями ПГ-1 и ПГ-2 показывает в целом достаточно хорошее согласование большинства сравниваемых параметров: достигнуто не только хорошее качественное согласование и правильная оценка поведения параметров, а также количественное согласование расчетных и экспериментальных значений большинства сравниваемых параметров. Достаточно точно оценено время наступления большинства теплогидравлических явлений и событий режима. В целом подтверждена адекватность воспроизведения теплогидравлических явлений с помощью расчетного кода RELAP/MOD3.2.

*Исследование режима естественной циркуляции теплоносителя при последовательном уменьшении его массы в первом контуре ИСБ-ВВЭР: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук.: И.В. Ёлкин, М.П. Гашенко; исполн.: И.В. Гашенко, А.В. Басов, З.А. Лебедева, Г.А. Пуняева. — Электрогорск, 2004. — 256 с. — Инв. № 2.710.*

## **Анализ экспериментов на стенде ПСБ ВВЭР относительно матриц верификации для ВВЭР**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов;  
исполнитель канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфёнов*

Работа посвящена анализу экспериментов на крупномасштабном интегральном стенде ПСБ-ВВЭР с точки зрения матриц верификации для теплогидравлических кодов применительно к ВВЭР. Рассмотрены матрицы верификации теплогидравлических кодов для ВВЭР. При этом проанализированы теплогидравлические процессы и явления, реализующиеся в ВВЭР при авариях с большими течами, с малыми и средними течами и в переходных режимах. Отмечается, что ранее для трех указанных типов аварий экспертами были определены явления и процессы, играющие существенную роль для безопасной работы реакторной установки. Эти явления комплексно изучаются на экспериментальных стендах интегрального типа, структурно моделирующих реакторную установку. На интегральных стендах также проявляется взаимное влияние процессов и явлений. Более глубоко отдельные явления исследуются на специализированных стендах. Анализ доступных экспериментальных данных выявил практически полное отсутствие данных, полученных на интегральных стендах, моделирующих ВВЭР-1000. В течение 2001–2004 годов на стенде ПСБ-ВВЭР было выполнено 15 типов экспериментов. Каждый тип включает группу экспериментов, проведенных во время одного пуска стенда по близким сценариям. В результате этой работы были получены опытные данные для процессов и явлений из матриц верификации ВВЭР, по которым эта информация отсутствовала. В работе представлен перечень процессов и явлений, для которых получены новые данные после экспериментов на ПСБ-ВВЭР.

*Анализ экспериментов на стенде ПСБ ВВЭР относительно матриц верификации для ВВЭР: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн. Ю.В. Парфёнов. — Электрогорск, 2004. — 46 с. — Инв. № 1.709.*

## **Подготовка и проведение пуска-наладочных экспериментов по исследованию гидродинамического воздействия истекающего теплоносителя при разрывах трубопроводов на АЭС**

*Руководитель, исполнитель канд. техн. наук Г.В. Осокин*

В работе представлены результаты экспериментов по определению параметров струи истечения теплоносителя при имитации разрывов трубопроводов диаметром 19, 45, 56 и 70 мм. Опыты проводились при начальном давлении теплоносителя 12,5 МПа и температурах 220÷270 °С. Отмечается, что в ходе проведенных экспериментов, в каждом опыте были определены в процессе истечения следующие гидродинамические параметры струи теплоносителя:

- давление и температура воды перед соплом истечения и в сосуде высокого давления;
- расход воды в трубопроводе истечения.

Проведенные испытания позволили также отработать методику разрыва мембран имитирующих разрыв трубопроводов и определения момента времени разрыва. Результаты опытов показали, что экспериментальная установка обеспечивает проведение испытаний с истечением теплоносителя при разрыве трубопроводов в диапазоне параметров, заданных матрицей экспериментов.

*Подготовка и проведение пуско-наладочных экспериментов по исследованию гидродинамического воздействия истекающего теплоносителя при разрывах трубопроводов на АЭС: отчет о НИР / ФГУП ЭНИЦ; рук., исполн. Г.В. Осокин. — Электрогорск, 2004. — 39 с. — Инв. № 1.712.*

### **Экспериментальное исследование работоспособности натурального образца агрегата «насос-эжектор»**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: канд. техн. наук Е.И. Трубкин, инженер С.М. Никонов*

В работе отмечается, что во ФГУП ЭНИЦ разработан и смонтирован стенд для экспериментального исследования работоспособности натурального образца агрегата «насос-эжектор» для систем аварийного и планового расхолаживания первого контура АЭС нового поколения. Представлена методика расчета расходно-напорной характеристики эжектора с цилиндрической камерой смешения для диапазона основного геометрического параметра  $6,5 < m < 31,2$ .

Приведены результаты выполненных стендовых испытаний натурального образца агрегата «насос-эжектор» при параметрах: напор насоса (Н)  $\leq 6,6$  МПа; подача насоса (Q)  $\leq 83,3$  кг/с; коэффициент эжекции эжектора (u)  $\leq 3,0$ , которые показали, что:

- испытуемый образец агрегата «насос-эжектор» работает устойчиво при температурах перекачиваемой среды  $T_r = T_p \leq 60$  °С (более высокие температуры не исследовались);
- исследованный образец агрегата «насос-эжектор» способен создавать принудительную циркуляцию в контуре реактора с сопротивлением контура 0,2 МПа;
- экспериментальная характеристика насоса ЦНС-300-600 совпадает с паспортной;
- опытная характеристика эжектора соответствует расчетной, полученной по предложенной методике;
- эжектор включается в работу при подаче на рабочее сопло расхода 83,3 кг/с и устойчиво работает в диапазоне коэффициентов эжекции  $u < 3$  при параметрах пассивной среды:  $P=0,2$  МПа,  $T \leq 60$  °С и рабочей среды:  $P \leq 6,5$  МПа,  $T \leq 60$  °С.

Исследование работоспособности агрегата «насос-эжектор» при прокачивании воды с растворенным газом возможно при небольшой модернизации стенда, а для исследования эрозионной стойкости рабочего сопла эжектора в условиях работы при натуральных параметрах разработана схема стенда.

*Экспериментальное исследование работоспособности натурального образца агрегата «насос-эжектор»: отчет о НИР / ФГУП ЭНИЦ; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: Е.И. Трубкин, С.М. Никонов. — Электрогорск, 2004. — 36 с. — Инв. № 2.728.*

### **Геометрические характеристики элементов стенда ПСБ-ВВЭР**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнители: канд. техн. наук И.А. Липатов, инженеры С.М. Никонов,  
Г.И. Дрёмин, А.А. Ровнов, А.В. Капустин, А.В. Басов, А.И. Антонова,  
канд. техн. наук В.И. Гудков*

Объектом исследования является интегральный теплофизический стенд ПСБ-ВВЭР, моделирующий первый контур РУ ВВЭР-1000. Масштаб стенда ПСБ-ВВЭР: высотный — 1:1, объемно-мощностной — 1:300. Цель работы — создание базы данных геометрических характеристик элементов и основных систем интегрального теплофизического стенда ПСБ-ВВЭР. Представлены геометрические характеристики элементов стенда ПСБ-ВВЭР, необходимые для подготовки исходных данных для выполнения работ по верификации системных теплогидравлических кодов при реализации на стенде различных сценариев эксперимента. Подробно описаны также проточная часть, расположение штуцеров системы измерений.

*Геометрические характеристики элементов стенда ПСБ-ВВЭР: отчет о НИР / ФГУП ЭНИЦ; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: И.А. Липатов, С.М. Никонов, Г.И. Дрёмин и др. — Электрогорск, 2004. — 222 с. — Инв. № 2.705.*

### **Экспериментальное исследование на стенде ПСБ-ВВЭР влияния пассивных систем на температурное состояние твэл при двустороннем разрыве (2x100%) «горячего» трубопровода**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнитель: канд. техн. наук И.А. Липатов, инженер Г.И. Дремин,  
С.М. Никонов, А.А. Ровнов, А.В. Капустин, А.В. Басов, А.И. Антонова*

В работе представлен предварительный анализ выполненного на стенде ПСБ-ВВЭР эксперимента, моделирующего работу пассивных систем безопасности (ГЕ-2, СПОТ) в условиях гильотинного разрыва горячего трубопровода и наложения полной потери источников переменного тока, который показал, что:

- устойчивый расход охлаждающей воды из системы ГЕ-2 устанавливается после прогрева верхней части сосудов ГЕ-2;
- из-за конденсации пара, поступающего через уравнительную линию в сосуды ГЕ-2, имеет место увеличения количества воды в них, что приводит к увеличению времени работы каждой ступени;

- система ГЕ-2 обладает свойством саморегулирования. Это означает, что если уровень воды достигает отметки врезки уравнивающей линии (при заполнении сосуда реактора до уровня горячих трубопроводов), то поступление воды из ГЕ-2 прекращается. При снижении уровня воды ниже этой врезки расход воды из ГЕ-2 восстанавливается;
- в результате совместной работы пассивных систем удается поддерживать температуру поверхности имитаторов ТВЭЛ на требуемом уровне.
- в эксперименте не было достигнуто заданное время процесса, так как для этого необходимо имитировать влияние контейнмента (как противодействие). В результате прекращается отвод тепла через систему СПОТ и, соответственно, прекращается конденсация пара в первом контуре за счет работы СПОТ. Поэтому возникает небаланс поступающей воды из ГЕ-2 и выделяемой мощности в модели реактора. Результаты экспериментов показали эффективность совместной работы пассивных систем.

*Экспериментальное исследование на стенде псб-ввэр влияния пассивных систем на температурное состояние твэл при двустороннем разрыве (2х100%) «горячего» трубопровода: отчет о НИР / ФГУП ЭНИЦ; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: И.А. Липатов, Г.И. Дремин, С.М. Никонов и др. — Электрогорск, 2004. — 63 с. — Инв. № 2.729.1.*

### **Эксперимент на стенде ПСБ-ВВЭР с естественной циркуляцией при пошаговом уменьшении массы теплоносителя первого контура**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: канд. техн. наук И.А. Липатов, инженеры Г.И. Дрёмин, С.М. Никонов, А.А. Ровнов, А.В. Капустин, А.И. Антонова, канд. техн. наук В.И. Гудков*

В работе представлены экспериментальные данные, полученные в эксперименте ЕЦ-1, который был выполнен на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР в июле 2003 года. Эксперимент ЕЦ-1 выполнен в рамках программы сотрудничества с ОЕСД. Сценарий эксперимента построен таким образом, чтобы получить набор стационарных состояний при различном количестве теплоносителя, остающегося в первом контуре. Для того чтобы определить начальные и граничные условия эксперимента, предварительно был выполнен ряд вычислений с помощью кода RELAP5/Mod3.2. Данные, полученные в эксперименте ЕЦ-1, предназначены для оценки способности теплогидравлических кодов описывать различные механизмы отвода тепла от активной зоны реакторной установки с ВВЭР-1000 при различных режимах естественной циркуляции теплоносителя. Экспериментальные данные дополнены информацией о конфигурации оборудования и системе измерений стенда. Детально описаны начальные и граничные условия эксперимента.

*Эксперимент на стенде ПСБ-ВВЭР с естественной циркуляцией при пошаговом уменьшении массы теплоносителя первого контура: отчет о НИР / ФГУП ЭНИЦ;*

*рук. И.В. Ёлкин; исполн.: И.А. Липатов, Г.И. Дрёмин, С.М. Никонов и др. Электрогорск, 2004. — 196 с. — Инв. № 2.698.*

### **Анализ экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР относительно матриц верификации для ВВЭР**

*Руководитель д-р техн. наук В.И. Мелихов;  
исполнитель канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфёнов*

Проведен анализ экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР с точки зрения матриц верификации для теплогидравлических кодов применительно к ВВЭР. Отмечено, что эксперименты, выполненные на стенде ПСБ-ВВЭР, существенно улучшили степень заполнения матриц верификации для ВВЭР. В течение 2001–2004 гг. на стенде ПСБ-ВВЭР выполнены 15 типов экспериментов, каждый включает группу экспериментов (3–5), проведенных во время одного пуска стенда по близким сценариям. Эксперименты посвящены исследованию теплогидравлики ВВЭР в условиях аварий с большими, средними и малыми течами и для переходных режимов. В результате этой работы получены опытные данные интегральных экспериментов для 12 процессов и явлений из матриц верификации ВВЭР, по которым эта информация отсутствовала.

*Анализ экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР относительно матриц верификации для ВВЭР: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн. Ю.В. Парфёнов. — Электрогорск, 2004. — 46 с. — Инв. № 1.709.*

### **Анализ динамических режимов парогенератора ПГВ-440 четвёртого энергоблока Кольской АЭС**

*Руководитель работы д-р техн. наук А.Г. Агеев;  
исполнители: канд. техн. наук Р.В. Васильева, инженеры Ю.С. Горбунов,  
Т.Б. Подволоцкая*

Определено поведение физических параметров, характеризующих работу парогенератора при работе проектных систем измерения и регулирования в различных эксплуатационных режимах. При исследовании использовались штатные и специально оборудованные экспериментальные системы измерений. Получены экспериментальные данные по следующим режимам: ступенчатое изменение мощности на 10%, отключение-включение ГЦН, прекращение подачи питательной воды, сброс нагрузки со 100 до 50%, подъём нагрузки от 50 до 100%. Полученные экспериментальные данные необходимы для разработки рекомендаций по усовершенствованию работы автоматических систем водопитания и поддержания уровня воды в ПГВ-440 в динамических режимах эксплуатации парогенераторов.

*Анализ динамических режимов парогенератора ПГВ-440 четвёртого энергоблока Кольской АЭС: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. А.Г. Агеев; исполн.: Р.В. Васильева, Ю.С. Горбунов, Т.Б. Подволоцкая. — Электрогорск, 2004. — 60 с. — Инв. № 12.700.*

## **Доработка программного комплекса STEG для обеспечения возможности использования его для расчёта роста отложений на теплообменных трубках парогенератора ПГВ-1000М**

*Руководитель д-р техн. наук В.И. Мелихов;  
исполнители: канд. физ-мат. наук Ю.В. Парфёнов;  
от ЭНИИЦ МС канд. техн. наук А.А. Казанцев;  
от ГНЦ РФ ФЭИ: В.В. Сергеев, инженер Г.В. Бычкова*

Усовершенствована численная методика кода STEG путём применения современных, так называемых многосеточных методов, что привело к ускорению работы кода примерно в 5–6 раз. Выполнена кросс-верификация кода STEG и кода TRAC на основе теплогидравлического расчёта номинального режима работы ПГВ-1000. С помощью кода STEG выполнен сравнительный анализ теплогидравлических процессов в штатном и модернизированном варианте горизонтального парогенератора ПГВ-1000М. Показано, что в случае штатного варианта, примеси концентрируются около горячего коллектора, а в случае модернизированного — в области холодного торца. На основе результатов теплогидравлических расчётов, выполненных с помощью новой версии кода STEG на подробных расчётных сетках, проведено моделирование процесса роста отложений на теплообменных трубках парогенератора ПГВ-1000М.

*Доработка программного комплекса STEG для обеспечения возможности использования его для расчёта роста отложений на теплообменных трубках парогенератора ПГВ-1000М: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн.: Ю.В. Парфёнов, А.А. Казанцев, В.В. Сергеев, Г.В. Бычкова. — Электрогорск, 2004. — 314 с. — Инв. № 13.697.*

## **Экспериментальные исследования различных конструктивных вариантов антидебризных фильтров рабочей кассеты ТВС ВВЭР-440**

*Научный руководитель работы д-р техн. наук В.И. Солонин;  
руководитель работы д-р техн. наук В.А. Гашенко;  
исполнители: инженер В.С. Курсков, инженер О.Н. Абакумова, В.Г. Швеиц;  
от ОАО «МСЗ»: канд. техн. наук Г.А. Симаков, инженеры А.В. Иванов,  
В.М. Кочергин; от МЭИ канд. физ-мат. наук В.Д. Локтионов*

Проведены экспериментальные (стендовые) проверки эксплуатационных характеристик различных конструкций антидебризных фильтров (АДФ) кассет ТВС ВВЭР-440. Испытания АДФ проводились на экспериментальном стенде ФГУП «ЭНИЦ» и на стенде МГТУ им. Н.Э. Баумана. Полученные результаты необходимы для принятия решения об оснащении кассет ВВЭР-440 АДФ, повышающими их защищённость от дебриса.

*Экспериментальные исследования различных конструктивных вариантов антидебризных фильтров рабочей кассеты ТВС ВВЭР-440: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук.: В.И. Солонин, В.А. Гашенко; исполн.: В.С. Курсков, О.Н. Абакумова, В.Г. Швеиц и др. — Электрогорск, 2004. — 81 с. — Инв. № 4.704.*

### **Проведение испытаний для выбора оптимального варианта антидебризного фильтра для рабочей ТВС ВВЭР-440**

*Научный руководитель д-р техн. наук В.И. Солонин (МГТУ им. Н.Э. Баумана); руководитель работы инженер В.С. Курсков (ЭНИИ); исполнители: инженер О.Н. Абакумова, В.Г. Швец (ЭНИИЦ), канд. техн. наук В.Д. Локтионов (МЭИ ТУ); инженеры А.В. Иванов, Н.В. Одинцов, В.М. Кочергин (ОАО «МСЗ»); канд. техн. наук В.Г. Крапивцев (МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

Проведены испытания АДФ и фильтрующих устройств для ТВС ВВЭР-440. Исследованы девять новых вариантов. В процессе выполнения работы была произведена экспериментальная проверка АДФ и антидебризных устройств с точки зрения их антидебризной эффективности, величин гидравлического сопротивления без и в присутствии дебриза, влияния на распределение полей скоростей. Проведен сравнительный анализ полученных результатов из всего выполненного ранее объёма испытаний АДФ и фильтрующих устройств (22 варианта), который является основой для выработки рекомендаций и решений по оснащению рабочих кассет ТВС АДФ и фильтрующими устройствами с оптимальными характеристиками.

*Проведение испытаний для выбора оптимального варианта антидебризного фильтра для рабочей ТВС ВВЭР-440: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИИЦ»; рук.: В.И. Солонин, В.С. Курсков; исполн.: О.Н. Абакумова, В.Д. Локтионов, А.В. Иванов и др. — Электрогорск, 2005. — 28 с. — Инв. № 4.725.*

### **Анализ эффективности работы регенеративных подогревателей атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Бараненко; исполнители: инженеры О.А. Беляков, О.Е. Костюков*

Объект исследования – регенеративные подогреватели на АЭС с ВВЭР. Цель работы – анализ повреждений ПНД и ПВД и факторов, влияющих на их эффективную работу. Метод исследования – анализ данных контроля загрязнённости, данных по составу материалов теплообменных трубок ПНД и ПВД, изучение влияния отложений на повреждаемость трубчатки. В работе представлены результаты проведённого комплексного исследования, включающего анализ химического состава и прочностных свойств материалов теплообменных труб ПНД и ПВД, анализ мероприятий, внедрение которых должно способствовать повышению эксплуатационной надёжности ПНД и ПВД.

Отмечается, что к общепринятым подходам, реализация которых проводится на многих АЭС и позволяет существенно повысить эффективность эксплуатации регенеративных подогревателей, следует отнести следующие:

- замена медьсодержащего оборудования второго контура на таковое из коррозионно-стойких сталей или сплавов (замена ПНД и конденсаторов);
- замена оборудования из сталей перлитного класса на таковое из коррозионно-стойких сталей или сплавов (замена ПВД);
- совершенствование ВХР за счёт повышения значения рН до 9,6–9,8 и более, что позволяет снизить выход в теплоноситель соединений железа до 5 мкг/кг и менее;
- отсутствие во втором контуре меди позволяет снизить выход в теплоноситель соединений меди до 1 мкг/кг.

Возможен и промежуточный вариант: замена трубной системы ПНД на таковую из нержавеющей стали. Так, на АЭС с быстроходными турбинами, где установлены ПНД, теплообменная поверхность которых выполнена из нержавеющей стали, повреждено небольшое количество теплообменных труб ПГ.

*Анализ эффективности работы регенеративных подогревателей атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами: отчёт о НИР/ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Бараненко; исполн.: О.А. Беляков, О.Е. Костюков. — Электрогорск, 2005. — 20 с. — Инв. № 259.05.*

### **Сравнительный анализ результатов неразрушающего контроля оборудования и трубопроводов систем, важных для безопасности энергоблока атомной электрической станции с реакторной установкой ВВЭР 1000**

*Исполнитель инженер А.М. Разгильдеев*

Отмечается, что работа представлена как информационный материал и направлена на сравнение дефектов, выявленных по результатам неразрушающего контроля оборудования и трубопроводов контура теплоносителя реактора и важных для безопасности систем реакторного отделения на энергоблоках России с реактором ВВЭР 1000. Применительно к энергоблокам Балаковской, Калининской, Волгодонской и энергоблока №5 Нововоронежской АЭС за период с 2001 по 2004 год включительно на основании исходных данных, взятых из следующих источников:

- отчёта по оценке состояния безопасности при эксплуатации энергоблоков за период 2001–2004 годы;
- данных лабораторий металлов Балаковской, Калининской, Волгодонской и Нововоронежской АЭС;
- отчётов по итогам ППР Балаковской, Калининской, Волгодонской и Нововоронежской АЭС.

Делается заключение, что проведённый информационный сравнительный анализ позволяет:

- построить диаграммы дефектов в процессе эксплуатации;
- оценить качество выполняемых сварочных работ;

- прогнозировать динамику износа металла за счёт коррозии на оборудовании и трубопроводах контура теплоносителя реактора и важных для безопасности систем;
- оценить качество выполняемых ремонтных работ.

*Сравнительный анализ результатов неразрушающего контроля оборудования и трубопроводов систем, важных для безопасности энергоблока атомной электрической станции с реакторной установкой ВВЭР 1000: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; исполн. А.М. Разгильдеев. — Электрогорск, 2005. — 55 с. — Инв. № 258.05.*

### **Анализ эффективности работы конденсаторов турбин атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами**

*Руководитель работы доктор техн. наук В.И. Бараненко; исполнители: инженеры О.А. Беляков, О.Е. Костюков*

Цель работы – определение закономерностей повреждения трубчатки конденсатора турбины, анализ факторов, влияющих на эффективную работу конденсаторов турбины. Метод исследования – анализ данных контроля загрязнённости, данных по составу материалов теплообменных трубок и трубных досок конденсаторов турбины, изучение влияния отложений на повреждаемость трубчатки. Представлены результаты проведённого анализа эксплуатации конденсаторов турбин отечественных и зарубежных АЭС, позволившие установить, что механизмы деградации металла теплообменных трубок определяются многими факторами:

- конструкционными материалами теплообменных трубок;
- условиями эксплуатации (тип охлаждающей воды);
- параметрами ВХР конденсата.

Отмечается, что характер распределения повреждённых трубок конденсаторов на отечественных энергоблоках объясняется тем, что в первые годы эксплуатации из строя выходят трубки, имеющие дефекты (металлургические – неравномерности состава сплава, заводские – следы углерода, монтажные – трещины и задиры), а уже затем начинается выход из строя трубок под действием коррозионных сред: теплоносителя, охлаждающей воды и пароводяной смеси.

Для большинства отечественных АЭС с ВВЭР накипеобразование в трубках конденсаторов турбин не наблюдается. Эффективность работы конденсаторов турбин повышает нанесение на трубки и трубные доски антикоррозионного покрытия, которое снижает коррозионное воздействие охлаждающей среды на конструкционный материал конденсатора турбины. Оборудование систем внешнего охлаждения может эффективно эксплуатироваться без серьёзных осложнений, связанных с коррозией, накипеобразованием или биообрастанием, при неукоснительном выполнении следующих требований:

- обеспечение эффективной бактерицидной обработки охлаждающей воды.

- поддержание параметров ВХР ниже тех значений, при которых образуется накипь, или использование соответствующих замедлителей накипеобразования.
- уменьшение присосов кислорода системы.
- применение конструктивных решений, исключающих образование застойных зон и зон с малой скоростью потока охлаждающей воды.
- осуществление контроля состояния трубок и своевременной очистки теплообменных поверхностей от отложений.
- проведение мероприятий по защите от коррозии.

*Анализ эффективности работы конденсаторов турбины атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Бараненко; исполн.: О.А. Беляков, О.Е. Костюков. — Электрогорск, 2005. — 40 с. — Инв. № 256.05.*

### **Прогнозирование срока службы теплообменных трубок конденсаторов второго энергоблока Калининской атомной электрической станции**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Бараненко;  
исполнители: инженеры В.А. Беляков, Р.С. Истомин*

Представлены результаты анализа расчётов, проведённых с использованием данных эксплуатационного контроля теплообменных труб конденсатора блока 2 Калининской АЭС, позволяющие заключить, что:

- отбраковочной глубиной проникновения повреждения труб конденсатора является таковая равная 70% толщины стенки, в соответствии с этим требованием по результатам контроля 2000 г. должно быть заглушено 5, 25% от общего количества труб в потоке ЦН-2;
- среднее значение скорости проникновения повреждений для разных трубных досок составляет 0,055–0,060 мм/год, это означает, что в среднем сквозное повреждение трубок конденсатора с толщиной стенки 1 мм достигается за временной интервал 17–18 лет;
- если ситуация, характерная для повреждения труб в потоке ЦН-2 сохраняется и для трёх других потоков, то к 2009 г. сквозные повреждения могут иметь место на 31408 конденсаторных трубах, что составляет 26,9% от их общего количества;
- проведённые расчёты позволяют сделать вывод, что ресурсные характеристики труб конденсатора блока № 2 КЛнАЭС практически исчерпаны и дальнейшая эксплуатация конденсаторов может сопровождаться глушением повреждённых теплообменных труб.

*Прогнозирование срока службы теплообменных трубок конденсаторов второго энергоблока Калининской атомной электрической станции: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Бараненко; исполн.: В.А. Беляков, Р.С. Истомин. — Электрогорск, 2006. — 25 с. — Инв. № 284/04.*

## **Влияние различных факторов на появление дефектов теплообменных труб парогенераторов блока 3 Балаковской АЭС**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Бараненко;*

*исполнители: инженеры О.А. Беляков, О.Е. Костюков*

Приведён анализ данных исследования дефектов теплообменных труб парогенераторов блока 3 БалАЭС, которые появились в процессе эксплуатации блока.

Отмечается, что возникновение и развитие дефектов определяется рядом факторов: химсоставом материала трубчатки, наличием коррозионно-активных отложений, составом охлаждающей воды.

На всех ПГ основная часть дефектов обнаружена на длинном прямом участке трубчатки ПГ со стороны горячего коллектора (в районе первых четырёх решёток, считая от коллектора), что можно объяснить конструктивными особенностями и влиянием перепадов температуры вдоль каждой теплообменной трубы. Кроме того, на ЗПГ-4 значительные скопления дефектов встречаются на протяжении всей длины теплообменных труб.

На парогенераторах ЗПГ-1 и ЗПГ-4 дефекты в основном расположены под решётками, а в ЗПГ-2 и ЗПГ-3 – в основном на свободных участках теплообменных труб. В то же время статистика химотмывок говорит о том, что процентное содержание оксида меди в отложениях продуктов коррозии в ЗПГ-1 и ЗПГ-4 существенно больше, чем в ЗПГ-2 и ЗПГ-3. Сопоставление приведённых фактов приводит к выводу о том, что большему содержанию меди в отложениях соответствует больший процент дефектов, расположенных под решётками.

Исследование химсостава материалов было ограничено только исследованием содержания хрома и никеля. При этом установлено, что для ЗПГ-4 меньшие, чем для остальных ПГ, средние значения концентраций хрома и никеля соответствуют большему количеству дефектов трубчатки, обнаруженных за 2002–2005 гг.

Отмечается также, что в процессе эксплуатации Балаковской АЭС существенно менялись параметры воды, используемой для охлаждения конденсаторов блоков (в частности, увеличивалось общее солесодержание). Эти изменения способствовали повышению коррозионной активности охлаждающей воды.

*Влияние различных факторов на появление дефектов теплообменных труб парогенераторов блока 3 Балаковской АЭС: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Бараненко; исполн.: О.А. Беляков, О.Е. Костюков. — Электрогорск, 2006. — 24 с. — Инв. № 280.06.*

## **Разработка расчётной модели автоматизированной системы высокотемпературного коррозионного мониторинга. Испытание алгоритма прогнозирования коррозии расчётно-аналитическими методами**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.А. Гашенко;*

*исполнители: инженеры А.В. Ульянов, Д.Б. Жидков*

В работе отмечается, что:

- из анализа литературных источников и испытаний за рубежом можно сделать вывод о возможности использования системы высокотемпературного коррозионного мониторинга (СВКМ) в продувочной воде парогенераторов АЭС для контроля степени склонности среды влиять на скорость развития трещин ТОТ по механизму коррозионного растрескивания.
- проведены подготовительные работы для исследовательских и сертификационных испытаний СВКМ на стенде В-3 ФГУП «ЭНИЦ»;
- разработана расчётная модель СВКМ применительно к АЭС с ВВЭР-1000 для прогнозирования коррозионного растрескивания ТОТ ПГ и скорости коррозии;
- проведены испытания работы алгоритма «Прогнозирования развития коррозии теплообменного оборудования 2-го контура АЭС с ВВЭР с использованием коррозионного мониторинга» расчётно-аналитическим методом;
- после проведения стендовых испытаний СВКМ целесообразно провести её опытно-промышленную эксплуатацию на действующей АЭС с ВВЭР-1000 с целью подготовки исходных данных для разработки инструкции по эксплуатации СВКМ в составе АХК для обеспечения оперативного и долгосрочного прогнозов работоспособности ТОТ ПГ АЭС.

*Разработка расчётной модели автоматизированной системы высокотемпературного коррозионного мониторинга. Испытание алгоритма прогнозирования коррозии расчётно-аналитическими методами: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.А. Гашенко; исполн.: А.В. Ульянов, Д.Б. Жидков. — Электрогорск, 2006. — 60 с. — Инв. № 297.06.*

## **Проверка логики и результатов исполнения алгоритмов поиска причин нарушений ВХР, косвенного определения параметров ВХР и АРМ химика-лаборанта расчётно-аналитическими методами и корректировка алгоритмов. Испытания алгоритмов на разработанных демонстрационных моделях**

*Руководитель работы инженер А.В. Ульянов;*

*исполнители: инженеры А.Р. Преловский, О.В. Шатерникова,*

*В.А. Сафронов, Д.Б. Жидков, И.Н. Алаев, А.А. Пыжов, О.И. Мордасова*

Объектом исследования являются разработанные ранее технологические алгоритмы верхнего уровня систем контроля и управления водно-хи-

мическим режимом II контура АЭС с ВВЭР. Испытания этих алгоритмов подлежат проведению на созданном в ЭНИЦ стенде В-3, Полигоне СКУ ВХР. Цель работы: проверка работы алгоритмов расчётно-аналитическими методами и методами имитационного моделирования, корректировка алгоритмов, разработка демонстрационных моделей исполнения алгоритмов и испытания алгоритмов поиска причин нарушений ВХР с использованием разработанных моделей.

Представлены следующие результаты выполненных работ:

- методики выполнения проверок и испытаний;
- проверка логики и результатов исполнения алгоритмов поиска причин нарушений (аномалий) ВХР методами имитационного моделирования по двум методикам;
- проверка логики и результатов исполнения алгоритма косвенного определения параметров ВХР расчётным методом, а также с помощью имитаторов;
- испытания алгоритмов, обеспечивающих работу АРМ химика-лаборанта, в том числе проверка алгоритма определения приемлемости результатов измерений в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 5725(1-6)-2002 и ввода результатов лабораторных измерений в БД СКУ ВХР;
- разработка демонстрационных моделей исполнения алгоритмов и соответствующего программного обеспечения;
- испытания алгоритмов верхнего уровня СКУ ВХР на разработанных демонстрационных моделях.

Отмечается, что для уточнения модели ВХР и выявления границ применимости разработанных алгоритмов была выполнена серия дополнительных расчётов. При этом расчётно-аналитическая проверка алгоритмов показала работоспособность разработанных технологических решений, высокий уровень их программной реализации, готовность полигона СКУ ВХР к проведению испытаний по разработанной ранее «Программе исследовательских испытаний».

*Проверка логики и результатов исполнения алгоритмов поиска причин нарушений ВХР, косвенного определения параметров ВХР и АРМ химика-лаборанта расчётно-аналитическими методами и корректировка алгоритмов. Испытания алгоритмов на разработанных демонстрационных моделях: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. А.В. Ульянов; исполн.: А.Р. Преловский, О.В. Шатерникова, В.А. Сафронов и др. — Электрогорск, 2006. — 213 с. — Инв. № 299.06.*

## **Анализ распределения заглушенных теплообменных труб в объёме парогенераторов блоков КЛНАЭС и БАЛАЭС. Прогнозирование повреждаемости теплообменных труб с использованием вероятностных методов**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Бараненко;  
исполнители: инженеры О.А. Беляков, О.Е. Костюков*

Представлены результаты изучения распределения заглушенных ТОТ по объёму парогенераторов блоков КЛНАЭС-1, БалаЭС-2 и БалаЭС-3. Отмечается, что при изучении повреждаемости ТОТ была учтена повторяемость некоторых записей о координатах ТОТ ПГ в исходных данных. Исходные данные относятся к дефектам, которых у заглушенной ТОТ может быть несколько. Повторяющиеся записи использованы не были. Приведены данные анализа динамики глушения ТОТ ПГ для блоков КЛНАЭС-1, БалаЭС-2 и БалаЭС-3; выполнен прогноз глушения теплообменных трубок на ближайшие годы. При исследовании динамики глушения ТОТ ПГ использовался метод наименьших квадратов и вероятностный метод Вейбулла. Отмечается также, что в результате анализа всех исходных данных обнаружена следующая закономерность: процесс глушения ТОТ ПГ можно разбить на интервалы времени по три года; в пределах каждого трёхлетнего интервала коэффициенты Вейбулла считаются постоянными. Погрешность аппроксимации не превышает нескольких процентов. Указанная закономерность зависит от изменений условий эксплуатации трубчатки ПГ, которые, в свою очередь, могут быть связаны, например, с началом новой топливной кампании; при этом на основе данных по различным интервалам времени можно получить различные прогнозы количества заглушенных ТОТ ПГ и при этом характер роста количества заглушенных ТОТ каждого ПГ предсказывается правильно, несмотря на то, что количество заглушенных ТОТ может в прогнозе существенно отличаться от истинных значений.

*Анализ распределения заглушенных теплообменных труб в объёме парогенераторов блоков КЛНАЭС и БАЛАЭС. Прогнозирование повреждаемости теплообменных труб с использованием вероятностных методов: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Бараненко; исполн.: О.А. Беляков, О.Е. Костюков. — Электрогорск, 2006. — 30 с. — Инв. № 282.06.*

## **Сепарационные характеристики парогенератора ПГВ-1000 со штатной сепарационной схемой**

*Исполнители: д-р техн. наук А.Г. Агеев, канд. техн. наук Р.В. Васильева,  
инженеры Ю.С. Горбунов, Г.Б. Кожаринова*

Объект исследования — парогенератор ПГВ-1000 энергоблока с ВВЭР-1000. Цель работы — исследование сепарационной схемы ПГВ-1000 головного энергоблока ВВЭР-1000 Нововоронежской АЭС. Метод исследования — измерение влажности пара в паропроводе и паровом объёме, уровня воды, мощности ПГ для определения сепарационных характеристик. Приведены и проанализированы полученные результаты: обнаружен нерасчётный

выброс пароводяной смеси из опускного канала между корпусом ПГ и закраиной ПДЛ с «горячей» стороны при мощности блока 80–85%, приводящий к выносу влаги в паропровод. Установка отбойных щитков перед крайними рядами жалюзийного сепаратора с «горячей» стороны ПГ позволила обеспечить характеристики ПГВ-1000 по паропроизводительности и влажности пара, отвечающие техническим условиям на поставку. Вместе с тем, выброс пароводяной смеси в паровой объём ПГ не устранён, интервал допустимого изменения уровня над ПДЛ крайне ограничен, имеющийся запас по паропроизводительности 8–10% приблизительно соответствует теплогидравлической неравноценности циркуляционных петель блока и поэтому недостаточен.

*Сепарационные характеристики парогенератора ПГВ-1000 с штатной сепарационной схемой: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; исполн.: А.Г. Агеев, Р.В. Васильева, Ю.С. Горбунов, Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2006. — 38 с. — Инв. № 12.727.*

## **Исследование эффективности «сухой» консервации парогенератора ПГВ-1000М. Часть 2**

*Руководитель д-р техн. наук В.А. Гашенко;*

*исполнители: инженеры А.Л. Тарасюк, А.В. Ульянов, О.В. Шатерникова, В.А. Сафронов, Д.Б. Жидков*

Проведен второй этап исследовательских испытаний эффективности процедур «сухой» консервации парогенератора ПГВ-1000М в рамках решения задачи оценки влияния режимов стоянки на процессы локальной коррозии теплообменных труб (ТОТ) и уточнения расчетной модели процессов зарождения и развития дефектов ТОТ в процессе эксплуатации. Исследовательские испытания проводились на крупномасштабной модели горизонтального парогенератора ПГВ-1000М стенда В-3 при наличии отложений оксидов ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) на внутренней поверхности корпуса модели ПГ, в том числе на ТОТ. Установлено, что в режиме «сухой» консервации, когда имитируется открытие БРУ-А и после слива воды 2 контура открывается один из нижних штуцеров, при наличии отложений на внутренних поверхностях модели ПГ внутреннего запаса тепла и созданных условий вентиляции не достаточно для полного ее высыхания. Внутренние поверхности модели ПГ после остывания находятся во влажном состоянии. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при оценке эффективности штатной процедуры «сухой» консервации прототипа — парогенератора ПГВ-1000М.

Также отмечается, что в рамках проведения первого этапа испытаний на стенде В-3 были получены экспериментальные данные по эффективности «сухой» консервации ПГВ-1000М в условиях отсутствия отложений на «чистой» модели ПГ.

*Исследование эффективности «сухой» консервации парогенератора ПГВ-1000М. Часть 2: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.А. Гашенко; исполн.: А.Л. Тарасюк,*

*А.В. Ульянов, О.В. Шатерникова, В.А. Сафронов, Д.Б. Жидков. — Электрогорск, 2006. — 25 с. — Инв. № 491/17.*

## **Верификация расчётного кода «УДАР-3Д» для определения гидродинамического воздействия при разрывах трубопровода высокого давления**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Мелихов;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфёнов, инженер Т.Н. Ретивова*

В работе содержится описание кода УДАР-3Д, предназначенного для определения воздействий на окружающие конструкции ударных волн и струй теплоносителя, образующихся при разрывах трубопроводов высокого давления.

Представлены результаты кросс-верификационного расчёта кода УДАР-3Д. Проводилось сопоставление с расчётными результатами, полученными другими авторами для задачи о воздействии на преграду вскипающей струи. Начальные условия теплоносителя в трубопроводе: давление 15 МПа, температура 573 К, радиус течи  $r_0=0,25$  м. Отмечено, что получено хорошее совпадение всех основных параметров.

Представлены результаты верификации кода УДАР-3Д на двух экспериментах, выполненных на стенде БК В-213 ФГУП «ЭНИЦ». В экспериментах определялись параметры динамического воздействия на преграды ударной волны и струи истекающего теплоносителя. Эксперименты проводились при начальном давлении теплоносителя 12,5 МПа и температуре 270÷280 °С. Расстояние до экрана составляло 250 мм в первом эксперименте и 750 мм во втором эксперименте.

При этом в процессе верификации был проведён анализ экспериментальных данных, полученных на стенде БК В-213, разработана расчётная схема экспериментального стенда для выполнения верификационных расчётов кодом УДАР-3Д и выполнены сами верификационные расчёты. В ходе верификации было выполнено улучшение математической модели и численного метода кода УДАР-3Д. Расчёты, выполненные с помощью улучшенного кода УДАР-3Д, показали хорошее совпадение с экспериментальными данными для обоих экспериментов.

*Верификация расчётного кода «УДАР-3Д» для определения гидродинамического воздействия при разрывах трубопровода высокого давления: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн.: Ю.В. Парфёнов, Т.Н. Ретивова. — Электрогорск, 2006. — 98 с. — Инв. № 13.739.*

## **Верификация расчётного кода «Удар-3D» для определения гидродинамического воздействия при разрывах трубопровода высокого давления. Обобщённая база данных**

*Руководитель д-р техн. наук В.И. Мелихов;  
исполнители: канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфёнов,  
инженеры М.В. Давыдов, Т.Н. Ретивова*

Проведено описание обобщённой базы экспериментальных данных по проектным и запроектным авариям, теплогидравлике активной зоны, свойствам материалов, необходимой для расчётных кодов и систем расчётных кодов, разрабатываемых для обоснования новых проектов ВВЭР, в первую очередь «АЭС-2006».

База экспериментальных данных включает в себя:

- а) экспериментальные данные по проектным и запроектным авариям на основе экспериментов на установке ПСБ-ВВЭР (часть 1);
- б) данные по комплексу экспериментальных исследований стационарных режимов критического истечения водяного теплоносителя (часть 2);
- в) опытные данные по срыву и осаждению жидкой фазы в дисперсно-кольцевом потоке теплоносителя (часть 3);
- г) опытные данные по конденсации пара в потоке недогретой до температуры насыщения воды (часть 4);
- д) данные по результатам экспериментальных исследований сборок ВВЭР в условиях тяжёлых аварий на установке ПАРАМЕТР по заливу сборки сверху (эксперимент ПАРАМЕТР-SF-1) (часть 5).

*Верификация расчётного кода «Удар-3D» для определения гидродинамического воздействия при разрывах трубопровода высокого давления. Обобщённая база данных: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн.: Ю.В. Парфёнов, М.В. Давыдов, Т.Н. Ретивова. — Электрогорск, 2006. — 511 с. — Инв. № 13.738 (1, 2, 3, 4, 5).*

## **Экспериментальная отработка элементов конструкции рабочей кассеты ВВЭР-440**

*Руководитель работы инженер В.С. Курсков;  
исполнители: д-р техн. наук В.А. Гашенко, инженеры О.Н. Абакумова,  
И.В. Гашенко; от МГТУ им. Н.Э. Баумана: д-р техн. наук В.И. Солонин,  
канд. техн. наук В.Г. Крапивцев; от ОАО «МСЗ»: инженеры А.В. Иванов,  
Н.В. Одинцов, В.М. Кочергин*

Экспериментально отработана и оптимизирована конструкция нижнего узла и его компонентов для бесчехловой и штатной чехловой кассет реактора ВВЭР-440 с обеспечением:

- минимальной длины нижнего узла кассеты;
- приемлемого гидравлического сопротивления;
- выравнивания скоростей потока теплоносителя;

- необходимых характеристик по прочности и геометрической стабильности;
- повышения антидебризной защищённости рабочей кассеты
- по возможности, унификации нижних узлов бесчехловой и штатной чехловой кассеты.

Реализация выданных на основании проведенной работы рекомендаций по оптимизации конструкции нижнего узла кассет повысит их эксплуатационные характеристики, безопасность и надёжность.

*Экспериментальная отработка элементов конструкции рабочей кассеты ВВЭР-440: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.С. Курсков; исполн.: В.А. Гашенко, О.Н. Абакумова, И.В. Гашенко и др. — Электрогорск, 2006. — 65 с. — Инв. № 4.741.*

### **Анализ экспериментальных данных, полученных на установке КЦ и определение расходно-напорной характеристики агрегата «насос-эжектор»**

*Руководитель д-р техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: канд. техн. наук Е.И. Ёлкин, инженер С.М. Никонов*

В проекте «АЭС-2006» в системе аварийного и планового расхолаживания первого контура реакторной установки планируется использовать агрегат «насос-эжектор». В подтверждение возможности использования этого агрегата в ФГУП «ЭНИЦ» сооружён экспериментальный стенд и опытным путём получена его расходно-напорная характеристика. Опыты проведены в диапазоне параметров: напор насоса  $\leq 7,0$  МПа; подача насоса  $\leq 84$  кг/с; температура теплоносителя — вода  $\leq 65$  °С. Показано, что эжектор включается в работу при подаче на рабочее сопло расхода  $\sim 84$  кг/с и устойчиво работает в диапазоне коэффициентов эжекции ( $U$ )  $\leq 0,9$  при параметрах пассивной среды ( $P \sim 0,2$  МПа,  $T \leq 65$  °С) и рабочей среды ( $P \sim 6,0$  МПа,  $T \leq 65$  °С). Опытами подтверждено, что для использования агрегата «насос-эжектор» в предлагаемой системе необходимы:

- расширение диапазона коэффициента эжекции ( $U$ ) до 2,5;
- проведение ресурсных испытаний эрозионной стойкости проточной части в обеспечение проектного ресурса эжектора;
- исследование шумовых характеристик агрегата «насос-эжектор».

*Анализ экспериментальных данных, полученных на установке КЦ и определение расходно-напорной характеристики агрегата «насос-эжектор»: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: Е.И. Трубкин; С.М. Никонов. — Электрогорск, 2006. — 30 с. — Инв. № 2.737.*

### **Сепарационные характеристики парогенератора ПГВ-1000 с модернизированными сепарационными схемами**

*Исполнители: д-р техн. наук А.Г. Агеев, канд. техн. наук Р.В. Васильева, инженеры Ю.С. Горбунов, Г.Б. Кожаринова*

Исследованы результаты поэтапной модернизации сепарационной схемы парогенератора. Показано, что:

- перекрытие опускного канала между корпусом ПГ и закраиной ПДЛ дополнительными перфорированными листами (I блок Бал. АЭС) устранило выброс пароводяной смеси в паровой объем и улучшило условия сепарации;
- замена жалюзийного сепаратора пароприемным щитом при устраненном выбросе пароводяной смеси (IV блок Бал. АЭС) позволила за счет увеличения высоты парового объема с 750 мм до 1200 мм;
- снизить влажность пара на выходе ПГ до 0,01–0,02 %;
- повысить запас по паропроизводительности в 1,4 раза (по расчету);
- увеличить допустимый диапазон изменения уровня над ПДЛ на 20–40 мм, в опускном канале в торце ПГ на 100 мм;
- улучшить условия ревизии, обслуживания и ремонта верхней части ПГ;
- применение ПДЛ с насадками при наличии в ПГ жалюзийного сепаратора (I блок Хм. АЭС) позволило:
- увеличить предельное положение уровня над ПДЛ для штатных ПГ с 200 до 300 мм;
- уменьшить остаточную неравномерность нагрузки зеркала испарения после ПДЛ и увеличить запас по паропроизводительности до 2 раз (по расчету);

Применение ПДЛ с насадками и замена жалюзийного сепаратора пароприемным щитом обеспечит:

- увеличение предельного положения уровня над ПДЛ до 350–400 мм;
- поддержание уровня воды в опускном канале в торце ПГ выше отметки ПДЛ и существенное увеличение запаса воды, улучшение условий работы теплообменной поверхности.

*Сепарационные характеристики парогенератора ПГВ-1000 с модернизированными сепарационными схемами: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; исполн.: А.Г. Агеев, Р.В. Васильева, Ю.С. Горбунов, Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2006. — 60 с. — Инв. № 12.744.*

### **Проведение исследовательских испытаний системы высокотемпературного коррозионного мониторинга (СВКМ)**

*Руководитель работы инженер А.В. Ульянов;*

*исполнители: инженер А.Р. Преловский, О.В. Шатерникова, В.А. Сафронов, Е.В. Муравьев, Г.А. Климова*

Объектом исследовательских испытаний является СВКМ теплообменных труб (ТОТ) парогенератора (ПГ) АЭС с ВВЭР-1000, устанавливаемая на пробоотборной линии продувочной воды модели ПГ стенда В-3. Проведена проверка работоспособности датчика электрохимического коррозионного потенциала и системы в целом. Полученные данные могут быть использованы для расширения возможностей действующих систем мониторинга коррозионных процессов за счёт внедрения новых современных средств и методов контроля, работающих при повышенных параметрах проб теплоносителя на АЭС с ВВЭР.

*Проведение исследовательских испытаний системы высокотемпературного коррозионного мониторинга (СВКМ): отчёт о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. А.В. Ульянов; исполн.: А.Р. Преловский, О.В. Шатерникова, В.А. Сафронов и др. — Электрогорск, 2007. — 42 с. — Инв. № 336.08.*

### **Доработка агрегата «насос-эжектор» с целью получения проектной расходно-напорной характеристики. Ресурсные испытания маломасштабной модели эжектора**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Мелихов;  
исполнитель канд. техн. наук Ю.В. Парфёнов*

Выполнены расчётные исследования с целью определения конструкции эжектора, обеспечивающей проектные характеристики с помощью кода FNSYSCFX 11.0 (CFX). Представлены результаты верификационных пост-тестовых расчётов экспериментов, выполненных ранее на стенде КЦ в 2006 году. На основе результатов вариантных расчётов, проведенных кодом CFX, определена оптимальная конструкция эжектора, удовлетворяющая требованиям проектанта. Из-за сложности предложенной конструкции предложено сначала испытать модель эжектора (масштаб 1:20 по площадям проходных сечений) и выполнить верификацию кода CFX на результатах проведенных исследований. Приводятся результаты претестовых расчётов расходно-напорной характеристики и гидродинамических параметров модели эжектора с помощью кода CFX. В Приложении дано Техническое задание на изготовление модели эжектора.

*Доработка агрегата «насос-эжектор» с целью получения проектной расходно-напорной характеристики. Ресурсные испытания маломасштабной модели эжектора: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов, исполн. Ю.В. Парфёнов. — Электрогорск, 2007. — 97 с. — Инв. 13.809.*

### **Экспериментальное определение механических нагрузок (крутящего момента и угла поворота), создаваемых машиной перегрузочной на головке рабочей кассеты третьего поколения ВВЭР-440, при проведении транспортно-технологических операций.**

#### **Разработка рекомендаций по ограничению нагрузок на кассету**

*Руководитель работы инженер В.С. Курсков;  
исполнители: д-р техн. наук В.А. Гашенко, инженеры О.Н. Абакумова,  
А.В. Иванов, Н.В. Одинцов, В.М. Кочергин*

Разработаны эскизы и изготовлен опытный образец узла захвата рабочей кассеты (РК ВВЭР-440), исключаяющей крутящий момент на кассету при её перегрузке, проведены его испытания. Полученные результаты могут быть использованы при принятии решений по промышленному внедрению нового узла захвата, обеспечивающего неповреждаемость кассеты.

*Экспериментальное определение механических нагрузок (крутящего момента и угла поворота), создаваемых машиной перегрузочной на головке рабочей кассеты третьего поколения ВВЭР-440, при проведении транспортно-технологических*

*операций. Разработка рекомендаций по ограничению нагрузок на кассету: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.С. Курсков; исполн.: В.А. Гашенко, О.Н. Абакумова, А.В. Иванов и др. — Электрогорск, 2007. — 27 с. — Инв. № 4.810.*

### **Создание обобщенной базы экспериментальных данных для задач аттестации сквозного кода Сократ**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Мелихов;*

*исполнители: канд. техн. наук Ю.В. Парфенов, инженер М.В. Давыдов*

Приводится описание обобщенной базы экспериментальных данных по экспериментам на ПСБ-ВВЭР, в которых моделируются теплогидравлические процессы в запроектных авариях в РУ ВВЭР и учитываются процедуры по управлению авариями. Данная база данных предназначена для задач аттестации сквозного кода СОКРАТ, создаваемого для обоснования новых проектов ВВЭР, в первую очередь «АЭС-2006». База экспериментальных данных включает в себя:

- эксперименты на ПСБ-ВВЭР по моделированию теплогидравлических процессов в запроектных авариях в РУ ВВЭР;
- эксперименты на ПСБ-ВВЭР по моделированию аварий с процедурами управления в РУ ВВЭР.

*Создание обобщенной базы экспериментальных данных для задач аттестации сквозного кода СОКРАТ: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн.: Ю.В. Парфенов, М.В. Давыдов. — Электрогорск, 2007. — 129 с. — Инв. № 13.815.*

### **Экспериментальное исследование для верификации кодов по расчетам неравномерности паровой нагрузки при работе парогенератора на повышенной мощности. Разработка нодализационных схем и входных файлов**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Мелихов;*

*исполнитель канд. техн. наук Ю.В. Парфенов*

Код STEG планируется верифицировать на экспериментальных данных, полученных на крупномасштабной модели парогенератора стенда ПГВ-1000, сооруженного во ФГУП «ЭНИЦ». Разработана нодализационная схема стенда ПГВ-1000 и входные файлы.

*Экспериментальное исследование для верификации кодов по расчетам неравномерности паровой нагрузки при работе парогенератора по повышенной мощности. Разработка нодализационных схем и входных файлов: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн. Ю.В. Парфенов. — Электрогорск, 2007. — 7 с. — Инв. № 306.7.*

## **Завершение экспериментального обоснования работоспособности и эффективности агрегата «насос-эжектор» системы расхолаживания «АЭС-2006»**

*Руководитель работы — д-р техн. наук В.И. Мелихов, отв. исполнитель — канд. техн. наук Ю.В. Парфенов, инженер М.В. Давыдов*

Приведено краткое описание стенда КЦ для испытания агрегата «насос-эжектор» и полученные экспериментальные данные. Основной экспериментальный результат состоит в том, что из-за вскипания инжектируемой воды коэффициент инжекции ограничивается предельным значением 0,9. Разработана расчетная методика определения расходно-напорной характеристики агрегата «насос-эжектор» на основе использования теплогидравлического кода RELAP5/MOD3.2. Проведена верификация расчетной методики на полученных экспериментальных данных. Получено хорошее совпадение расчетной и экспериментальной расходно-напорной характеристики. Расчетное значение предельного коэффициента инжекции 1,0.

*Завершение экспериментального обоснования работоспособности и эффективности агрегата «насос-эжектор» системы расхолаживания «АЭС-2006»: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн.: наук Ю.В. Парфенов, М.В. Давыдов. — Электротгорск, 2007. — 18 с. — Инв. № 305/07.*

## **Проектирование и изготовление уменьшенной модели эжектора для проведения ресурсных испытаний. Создание стенда для проведения ресурсных испытаний модели эжектора.**

### **Проведение ресурсных испытаний**

*Исполнители д-р техн. наук И.В. Ёлкин, д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов, канд. техн. наук Е.И. Трубкин, канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфенов*

В работе представлены результаты ресурсных испытаний уменьшенной модели (масштаб 1:20 по площадям проходных сечений) новой конструкции эжектора, входящего в состав агрегата «насос-эжектор» системы аварийного и планового расхолаживания первого контура «АЭС-2006». Конструкция эжектора, обеспечивающая улучшенную расходно-напорную характеристику, была определена в ходе претестовых вариантных расчетов трехмерным гидродинамическим кодом ANSYS CFX 11.0 (CFX). На основе полученных результатов было подготовлено техническое задание на проектирование модели эжектора для проведения ресурсных испытаний, в соответствии с которым была спроектирована и изготовлена модель эжектора. Ресурсные испытания модели эжектора проведены в следующем диапазоне режимных параметров: давление воды (рабочая среда) перед соплом эжектора  $\leq 60$  МПа, температура рабочей среды  $\leq 60$  °С, расход рабочей среды  $\leq 3,5$  кг/с, давление перекачиваемой воды (пассивная среда)  $\leq 0,2$  МПа, температура пассивной среды  $\leq 60$  °С.

*Проектирование изготовление уменьшенной модели эжектора для проведения ресурсных испытаний. Создание стенда для проведения ресурсных испытаний модели*

*эжектора. Проведение ресурсных испытаний: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; исполн.: И.В. Ёлкин, О.И. Мелихов, Е.И. Трубкин, Ю.В. Парфенов. — Электрогорск, 2007. — 24 с. — Инв. № 13.812.*

**Подготовка экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР с начальной мощностью 1,5 МВт по исследованию влияния пассивных систем безопасности на температурное состояние твэл при разрыве «горячего» трубопровода и при разрыве «холодного» трубопровода**

*Руководитель темы д-р техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: канд. техн. наук С.М. Никонов, инженер А.В. Басов*

Объектом исследования является влияние пассивных систем на температурное состояние твэл при разрыве «холодного» и «горячего» трубопроводов и наложением полного обесточивания станции.

Цель работы:

- проверка инженерных решений, направленных на повышение безопасности АЭС в условиях гильотинного разрыва трубопровода циркуляционного контура с наложением потери всех источников переменного тока.
- получение новых экспериментальных данных для целей верификации теплогидравлических кодов.

Представлено краткое описание специальных систем, разработанных и смонтированных на интегральной теплофизической установке ПСБ-ВВЭР для исследования температурного состояния имитаторов твэл в условиях работы пассивных систем безопасности РУ ВВЭР-1000.

К системам, смонтированным на ПСБ-ВВЭР, в рамках данной работы относятся:

- система имитации гильотинного разрыва циркуляционного трубопровода;
- модель системы ГЕ-2;
- система подачи газовой смеси на вход модели активной зоны;
- система, имитирующая воздействие СПОТ.

Для выполнения экспериментов необходимо обеспечить:

- геометрическое подобие трубопроводов связи ГЕ-2 с первым контуром;
- подобие системы аварийного газоудаления.

Эксперименты на стенде ПСБ-ВВЭР необходимо провести с учётом влияния неконденсирующихся газов, генерируемых в РУ, и газов, растворённых в теплоносителе ГЕ-1. Также необходимо рассмотреть возможность измерения газосодержания в первом контуре и изготовить систему измерения газосодержания в первом контуре. Представлены обоснование выбора начальных и граничных условий выполнения эксперимента на стенде ПСБ-ВВЭР и подробный сценарий эксперимента, адаптирован-

ный применительно к условиям стенда, с обоснованием его начальных и граничных условий.

*Подготовка экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР с начальной мощностью 1,5 МВт по исследованию влияния пассивных систем безопасности на температурное состояние твэл при разрыве «горячего» трубопровода и при разрыве «холодного» трубопровода: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: С.М. Ни- конов, А.В. Басов. — Электрогорск, 2008. — 43 с. — Инв. № 318/08.*

## **Пополнение базы экспериментальных данных для АЭС с ВВЭР и её интеграция с системой проектирования АЭС-2006**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Мелихов;  
исполнитель канд. техн. наук Ю.В. Парфёнов, М.В. Давыдов*

В базе данных размещены результаты выполненных экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР по большим течам: двухсторонний разрыв 2x25% ГЦТ на выходе из реактора, двухсторонний разрыв 2x100% ГЦТ на выходе из реактора с работой пассивных систем безопасности, двухсторонний разрыв ГЦТ на входе в реактор. Также база данных была пополнена данными экспериментов по течам 2,4% и 11% из верхней камеры смешения, проведенных на стенде ИСБ-ВВЭР. Были подготовлены и включены в базу данных результаты экспериментальных исследований модельных сборок ВВЭР на установке ПАРАМЕТР по заливу сборки твэлов одновременно сверху и снизу в условиях, имитирующих тяжёлую аварию ВВЭР (PARAMETER-SF-2). База данных также была пополнена результатами экспериментов на установке ЭВТУС (ГНЦ РФ-ФЭИ), в которых моделировались процессы, характерные для аварийных ситуаций, вызванных потерей теплоносителя либо ростом мощности энерговыделения. В качестве тестовых выбраны эксперименты следующих типов: 1) с прекращением и последующим восстановлением расхода; 2) со ступенчатым набросом и сбросом мощности на рабочем участке; 3) смешанный процесс. Была создана база данных для верификации и уточнения математических моделей повторного залива теплогидравлических расчётных кодов, основанная на результатах, выполненных в ГНЦ РФ-ФЭИ экспериментов по расхолаживанию полномасштабных по высоте электрообогреваемых моделей ТВС ВВЭР в условиях нижнего, верхнего и комбинированного повторного залива АЗ ВВЭР при аварии с потерей теплоносителя. Создан новый раздел базы данных по теплофизическим свойствам реакторных материалов: 1) циркония, его оксидов, боридов, гидридов, дейтеридов; 2) гафния, его оксида и боридов. Созданная база экспериментальных данных интегрирована в систему проектирования АЭС-2006, разрабатываемую во ВНИИАЭС, для целей валидации математической модели энергоблока АЭС-2006. Проведена валидация математической модели энергоблока АЭС-2006 на базе эксперимента с большой течью из первого контура на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР. Изложена методика

моделирования, рассчитаны и сравнены с экспериментальными данными основные теплогидравлические параметры.

*Пополнение базы экспериментальных данных для АЭС с ВВЭР и её интеграция с системой проектирования АЭС-2006: отчёт о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов, исполн.: Ю.В. Парфёнов, М.В. Давыдов. — Электрогорск, 2008. — 185 с. — Инв. 334.08.*

### **АЭС-2006. Экспериментальные исследования аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода на стенде ПСБ ВВЭР**

*Руководитель д-р техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнитель инженер А.В. Капустин*

Выполнен эксперимент «Двусторонний гильотинный разрыв главного циркуляционного трубопровода (полным сечением) на входе в реактор при мощности 10 МВт». Эксперимент продолжался 1477 с и был остановлен при увеличении температуры имитаторов ТВЭЛ до 516 °С.

*АЭС-2006. Экспериментальные исследования аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода РУ ВВЭР-1000 на стенде ПСБ ВВЭР: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн. А.В. Капустин. — Электрогорск, 2008. — 14 с. — Инв. № 315.08.*

### **Экспериментальное исследование аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода РУ ВВЭР-1000 на стенде ПСБ-ВВЭР. Адаптация сценария эксперимента применительно к стенду ПСБ-ВВЭР с использованием системного теплогидравлического кода RELAP5**

*Руководитель д-р техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнитель канд. техн. наук А.В. Капустин*

Экспериментальное исследование аварий с большой течью в РУ типа ВВЭР является приоритетной научно-технической задачей. Обобщение накопленных экспериментальных данных по теплогидравлическим явлениям и процессам, которые происходят в РУ ВВЭР-1000 во время аварий с большими течами, показывает практически полное отсутствие данных, полученных на интегральных установках, моделирующих РУ ВВЭР-1000. Отсутствие таких данных тормозит процесс верификации отечественных теплогидравлических кодов и ставит преграды на пути к стратегической независимости российских проектов АЭС.

По современным требованиям к работам по верификации расчетных программ, применяемых для обоснования безопасности АЭС с реакторами ВВЭР, в состав экспериментальных установок, используемых для оценки программных средств, должен входить хотя бы один интегральный стенд, структурно подобный РУ ВВЭР. Одной из задач стенда ПСБ-ВВЭР является получение экспериментальных данных для верификации отечественных и зарубежных теплогидравлических кодов. Представлена матрица верификации для больших течей. Как видно из данной матрицы, стенд ПСБ-ВВЭР

можно использовать для получения экспериментальных данных для большого набора явлений, происходящих на разных стадиях аварии с большой течью. Важным является то, что эта экспериментальная установка позволяет воспроизвести всю последовательность стадий: осушение активной зоны (быстрое истечение), повторное заполнение нижней камеры реактора и повторный залив активной зоны. В матрице отмечено также, что интегральные эксперименты, моделирующие аварию с большой течью, пока не были выполнены на стенде ПСБ-ВВЭР.

Представлен сценарий, начальные и граничные условия эксперимента «Гильотинный разрыв циркуляционного трубопровода», который предполагается выполнить на стенде ПСБ-ВВЭР. Представлены результаты предварительного расчета с помощью системного кода RELAP5/MOD3.3. Задачей эксперимента является воспроизведение последовательности теплогидравлических явлений, протекающих в РУ ВВЭР-1000 при гильотинном разрыве циркуляционного трубопровода на стадиях осушения активной зоны (быстрого истечения), повторного заполнения нижней камеры реактора и повторного залива активной зоны, включая разогрев оболочки имитаторов ТВЭЛ активной зоны до температуры 500 °С.

*Экспериментальное исследование аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода РУ ВВЭР-1000 на стенде ПСБ-ВВЭР. Адаптация сценария эксперимента применительно к стенду ПСБ-ВВЭР с использованием системного теплогидравлического кода RELAP5: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн. А.В. Капустин. — Электрогорск, 2008. — 49 с. — Инв. № 314.08.*

### **Экспериментальное исследование аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода РУ ВВЭР-1000 на стенде ПСБ-ВВЭР. Обработка и анализ экспериментальных данных**

*Руководитель д-р техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: канд. техн. наук С.М. Никонов, инженер А.В. Басов*

Объект исследования – теплогидравлические процессы, имеющие место в первом и втором контурах крупномасштабной экспериментальной установки ПСБ-ВВЭР, моделирующей первой и частично второй контур реакторной установки ВВЭР-1000, возникающие при аварийном режиме с гильотинным (2х100%) разрывом «холодного» трубопровода и наложением полного обесточивания станции. Приведено краткое описание стенда, начальные и граничные условия эксперимента, проанализировано поведение параметров в первом и втором контурах стенда, приведены графики ключевых параметров. В результате анализа полученных экспериментальных данных определены теплогидравлические явления/процессы, которые необходимо воспроизвести расчетными компьютерными теплогидравлическими кодами.

*Экспериментальное исследование аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода РУ ВВЭР-1000 на стенде ПСБ-ВВЭР. Обработка и анализ экспериментальных данных: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: С.М. Никонов, А.В. Басов. — Электрогорск, 2008. — 81 с. — Инв. № 313.08.*

## **Разработка сценария эксперимента на стенде ПСБ-ВВЭР по моделированию аварии на АЭС-2006 с двухсторонним разрывом ГЦТ на входе в реактор**

*Руководитель темы д-р техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: канд. техн. наук С.М. Никонов, инженер А.В. Басов*

Для обоснования безопасности АЭС с ВВЭР ИБРАЭ РАН разработан и применяется расчётный код СОКРАТ. Этот код рекомендуется для использования при анализе проектных аварий при обосновании работоспособности и безопасности АЭС с ВВЭР. В соответствии с требованиями Федеральной службы по атомному надзору России расчётные коды должны быть верифицированы на основе экспериментальных данных. Для верификации используются результаты исследований на фрагментарных стендах, предназначенных для исследования отдельных эффектов, а также на интегральных установках. Целью данной работы является получение уникальных экспериментальных данных, которые необходимы для верификации теплогидравлических кодов и оценки безопасности ВВЭР-1000. Полученные экспериментальные данные существенно расширяют базу данных для верификации теплогидравлических кодов и закрывают некоторые «белые пятна» в матрице валидации для РУ ВВЭР. Объектом исследования являются теплогидравлические процессы, имеющие место в первом и втором контурах крупномасштабной экспериментальной установки ПСБ-ВВЭР в аварийном режиме при гильотинном (2х100%) разрыве «холодного» и «горячего» трубопроводов и наложением полного обесточивания станции. Приведено краткое описание стенда ПСБ-ВВЭР, системы измерений, сценарий и граничные условия эксперимента, проанализировано поведение теплогидравлических параметров в первом и втором контурах стенда, а также представлены результаты претестового расчёта, выполненного кодом СОКРАТ.

*Разработка сценария эксперимента на стенде ПСБ-ВВЭР по моделированию аварии на АЭС-2006 с двухсторонним разрывом ГЦТ на входе в реактор: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: С.М. Никонов, А.В. Басов. — Электрогорск, 2008. — 85 с. — Инв. № 319/08.*

## **Анализ водно-химического режима, система измерения уровня в различных режимах эксплуатации ПГ, разработка предложений и рекомендаций по выбору оптимального варианта ВКУ ПГ**

*Руководитель работы канд. техн. наук В.М. Корольков;*

*научный руководитель темы д-р техн. наук А.Г. Агеев;*

*исполнители: канд. техн. наук Ю.С. Горбунов, инженер Г.Б. Кожаринова*

Приведен анализ результатов теплохимических испытаний, выполненных в 2007 году на парогенераторах III блока Калининской АЭС и V блока Нововоронежской АЭС. Даны рекомендации по оптимизации регламента продувки и выбору оптимального варианта ВКУ ПГ. Выполнен анализ

основных положений предложенного МЭИ метода математического моделирования водяного объёма парогенераторов ПГВ-1000. Проанализированы возможности программного комплекса «Circ+Sal» в части моделирования циркуляции потока, гидродинамики водяного объёма и распределения примесей в объёме ПГ при различных вариантах продувки для штатной и модернизированной систем водопитания. Проанализированы результаты испытаний системы измерения уровня воды, выполненных в 2005-2006 гг. на ПГ блока III Калининской АЭС. Даны рекомендации по оптимизации системы измерения уровня воды в ПГ блоков АЭС с ВВЭР-1000.

*Анализ водно-химического режима, система измерения уровня в различных режимах эксплуатации ПГ, разработка предложений и рекомендаций по выбору оптимального варианта ВКУ ПГ: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук.: В.М. Корольков, А.Г. Агеев; исполн.: Ю.С. Горбунов, Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2008. — 54 с. — Инв. № 12.818.*

### **Анализ и обобщение опыта эксплуатации систем измерения уровня воды в ПГ блоков АЭС с ВВЭР-1000**

*Руководитель работы д-р техн. наук А.Г. Агеев; исполнители: канд. техн. наук Р.В. Васильева, инженеры Ю.С. Горбунов, Г.Б. Кожаринова*

Выполнен анализ работы систем измерения уровня воды блоков АЭС с ВВЭР-1000, а также результаты пуско-наладочных работ и испытаний уровнемеров парогенераторов при подготовке к пуску и эксплуатации III энергоблока Калининской АЭС и I блока Ростовской АЭС. Наладка и испытания систем измерения уровня воды выполнялись на всех этапах ввода в эксплуатацию блока № 3 Калининской АЭС, вплоть до сдачи блока в промышленную эксплуатацию. При выполнении работы использовались штатные системы измерения. Область применения полученных результатов – парогенераторы АЭС с ВВЭР-1000.

*Анализ и обобщение опыта эксплуатации систем измерения уровня воды в ПГ блоков АЭС с ВВЭР-1000: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. А.Г. Агеев; исполн.: Р.В. Васильева, Ю.С. Горбунов, Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2008. — 99 с. — Инв. № 12.819.*

### **Сбор и анализ исходных данных о повреждаемости, геометрии и режимах эксплуатации трубопроводов конденсатно-питательного тракта (КПТ), элементов оборудования (ПНД, ПВД) КПТ по водной стороне с построением их компьютерных геометрических моделей и разработкой предложений по подготовке дополнения к типовым программам эксплуатационного контроля металла трубопроводов АЭС с ВВЭР-1000**

*Исполнители: инженеры М.В. Давыдов, Б.П. Подволоцкий, О.А. Беляков*

Выполнены сбор и анализ исходных данных о повреждаемости, геометрии и режимах эксплуатации трубопроводов конденсатно-питательного

тракта (КПТ), элементов оборудования (ПНД, ПВД) КПТ по водной стороне с построением их компьютерных геометрических моделей и разработкой предложений по подготовке дополнения к типовым программам эксплуатационного контроля металла трубопроводов второго контура энергоблоков №2 и №3 Калининской АЭС.

*Сбор и анализ исходных данных о повреждаемости, геометрии и режимах эксплуатации трубопроводов конденсатно-питательного тракта (КПТ), элементов оборудования (ПНД, ПВД) КПТ по водной стороне с построением их компьютерных геометрических моделей и разработкой предложений по подготовке дополнения к типовым программам эксплуатационного контроля металла трубопроводов АЭС с ВВЭР-1000: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; исполн.: М.В. Давыдов, Б.П. Подволоцкий, О.А. Беляков. — Электрогорск, 2008. — 235 с. — Инв. № 16.822.*

**Расчетно-экспериментальная доработка агрегата «насос-эжектор» с целью улучшения расходно-напорной характеристики. Монтаж уменьшенных моделей эжектора на экспериментальном стенде. Проведение экспериментов по определению напорно-расходных характеристик эжекторов. Определение наиболее подходящего эжектора**

*Исполнители: д-р техн. наук И.В. Ёлкин, В.И. Мелихов, канд. техн. наук Е.И. Трубкин, канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфенов, канд. техн. наук С.М. Никонов*

Представлены результаты экспериментального исследования напорно-расходной характеристики модели эжектора (масштаб 1:27,7 по проходным сечениям к натурному образцу) с тангенциальным подводом пассивной воды. Опыты проведены на экспериментальной установке «Эжектор-М2» в диапазоне режимных параметров:

для рабочей среды:

давление (абсолютное) —  $\leq 7$  МПа;  
 температура —  $40 \div 100$  °С;  
 расход —  $3 \div 3,2$  кг/с.

для пассивной среды:

давление (абсолютное) —  $\leq 140$  кПа;  
 температура —  $40 \div 59$  °С;  
 расход —  $< 2,5$  кг/с.

В экспериментах установлено, что расход смешанной воды через эжектор составляет 5,2 кг/с или в пересчете на натурную модель 510 м<sup>3</sup>/ч, а максимальный напор в диапазоне расходов смешанной воды ( $3 \div 5,2$  кг/с) составляет, соответственно,  $2,0 \div 0,3$  МПа. В связи с тем, что опытная модель является высоконапорной, имеется возможность дальнейшей оптимизации эжектора с тангенциальным подводом перекачиваемой воды, в частности, в сторону повышения угловой скорости перекачиваемой воды в приемной камере эжектора.

*Расчетно-экспериментальная доработка агрегата «насос-эжектор» с целью улучшения расходно-напорной характеристики. Монтаж уменьшенных моделей эжектора на экспериментальном стенде. Проведение экспериментов по определению напорно-расходных характеристик эжекторов. Определение наиболее подходящего эжектора: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; исполнители: И.В. Ёлкин, В.И. Мелихов, Е.И. Трубкин, Ю.В. Парфенов, С.М. Никонов. — Электрогорск, 2009. — 30 с. — Инв.№ 349/09.*

### **Адаптация сценария экспериментов по моделированию на стенде ПСБ-ВВЭР течей из трубопроводов, соединяющих ГЕ-2 с первым контуром, с помощью кода RELAP5 (претест расчет)**

*Руководитель темы д-р техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнители: канд. техн. наук С.М. Никонов, инженер А.В. Басов*

В работе представлен претест анализ эксперимента «Течь из сливного трубопровода, соединяющего ГЕ-2 с первым контуром». Проанализировано поведение параметров в РУ и стенде ПСБ-ВВЭР. В отчете приведено краткое описание стенда, приведена конфигурация систем стенда и описано размещение измерений по элементам и системам стенда и характеристики измерительных каналов. На основании выбранных ключевых параметров дан краткий анализ планируемого эксперимента. В отчете отмечены теплогидравлические явления, наблюдаемые в эксперименте, с комментариями о том, насколько хорошо они воспроизведены в эксперименте и зафиксированы измерительной системой для целей оценки компьютерных теплогидравлических кодов.

*Адаптация сценария экспериментов по моделированию на стенде ПСБ-ВВЭР течей из трубопроводов, соединяющих ГЕ-2 с первым контуром, с помощью кода RELAP5 претест-расчет): отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: С.М. Никонов, А.В. Басов. — Электрогорск, 2009. — 82 с. — Инв. № 339.09.*

### **Экспериментальное исследование ПДЛ и ПДШ с переменной перфорацией для верификации кодов по расчетам неравномерности паровой нагрузки ПГ. разработка методики и расчет переменной перфорации ПДЛ применительно к условиям парогенератора ПГВ-1000**

*Руководитель работы д-р техн. наук А.Г. Агеев;  
исполнители: канд. техн. наук Б.Н. Корольков, инженеры С.А. Харченко, Г.Б. Кожаринова*

Показано, что модернизация сепарационной схемы ПГВ-1000, заключающаяся в устранении заброса пароводяной смеси из-под ПДЛ и замене жалюзийного сепаратора потолочным дырчатым щитом с применением ПДЛ с переменной перфорацией, позволит уменьшить остаточную неравномерность нагрузки зеркала испарения после ПДЛ и повысить паропроизводительность парогенераторов и увеличить электрическую мощность энергоблока ВВЭР-1000. Парогенераторы с жалюзийным осушителем и

ПДЛ с равномерной перфорацией работают на пределе по возможностям сепарационной схемы. Исследования парогенераторов на 5 энергоблоке Нововоронежской АЭС при повышенной на 5–8 паропроизводительности показали, что при номинальном уровне воды над ПДЛ, равном 200 мм, влажность пара превышает ее нормируемое значение 0,2 %.

Предложена методика и произведен расчет переменной перфорации ПДЛ применительно к условиям парогенератора ПГВ-1000.

*Экспериментальное исследование ПДЛ И ПДШ с переменной перфорацией для верификации кодов по расчетам неравномерности паровой нагрузки ПГ. разработка методики и расчет переменной перфорации ПДЛ применительно к условиям парогенератора ПГВ-1000: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. А.Г. Агеев; исполн.: Б.Н. Корольков, С.А. Харченко, Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2009. — 30 с. — Инв. № 340.09.*

### **Анализ и обобщение опыта эксплуатации систем измерения уровня воды в парогенераторах блоков АЭС с ВВЭР-1000**

*Исполнители: канд. техн. наук Б.Н. Корольков, Р.В. Васильева, инженер Г.Б. Кожаринова*

Представлены результаты анализа опыта БалаАЭС по проверке и наладке штатных систем измерения уровня в ПГ. Показано, что достоверность показаний уровнемеров определяется совокупностью факторов, трудно аналитически учитываемых при определении погрешностей измерительных каналов. Выявлена непригодность штатной системы КУП-1000 для тарировки уровнемеров: обнаружен большой разброс результатов параллельных измерений, а случайная составляющая основной погрешности измерения составляет  $\pm 12$  см. Метод может быть использован только при соответствующей доработке системы. Показано, что проверку системы измерения уровня в ПГ целесообразно проводить с помощью специальных тарировок на однофазной среде с помощью известных геодезических отметок; приведены результаты тарировок уровнемеров, даны рекомендации по обработке и представлению опытных данных.

Показана эффективность использования кондуктометрического метода для тарировки штатных уровнемеров. Погрешность тарировки с использованием кондуктометрических систем определяется погрешностью монтажа ПДЛ в ПГ. При установке кондуктометрических датчиков в зоне отборов уровнемеров погрешность не превышает 2–3 мм.

*Анализ и обобщение опыта эксплуатации систем измерения уровня воды в парогенераторах блоков АЭС с ВВЭР-1000: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; исполн.: — канд. техн. наук Б.Н. Корольков, Р.В. Васильева, инженер Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2009. — 38 с. — Инв. № 341.09.*

## **Оказание консультационных услуг по анализу водно-химического режима, систем измерения уровня в различных режимах эксплуатации, разработка предложений и рекомендаций по выбору оптимального варианта ВКУ ПГ**

*Руководитель работы канд. техн. наук Б.Н. Корольков;  
научный руководитель темы д-р техн. наук А.Г. Агеев;  
исполнитель инженер Г.Б. Кожаринова*

Представлены результаты анализа возможности применения в сепарационной схеме парогенератора ПГВ-1000 погруженного дырчатого листа, оснащенного безбарботажными инерционными насадками, отводящими пар из паровой «подушки» непосредственно в паровой объем выше уровня воды. Приведены результаты испытаний элементов ПДЛ с насадками диаметром 30, 80 и 120 мм, проведенных на стенде ОАО «ЭНИЦ», а также анализ результатов испытаний сепарационной схемы парогенератора с ПДЛ с насадками диаметром 80 мм, проведенных на полномасштабном стенде ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Из анализа результатов испытаний следует, что применение в сепарационной схеме парогенератора ПДЛ с насадками обеспечивает увеличение паровой нагрузки более, чем в два раза по сравнению со штатной сепарационной схемой, а также повышение предельного положения уровня воды над ЦДЛ с 200 мм — для штатной схемы — до 500 мм. Указанные преимущества сепарационной схемы с ПДЛ с насадками по сравнению со штатной обеспечат её надежную работу в условиях теплогидравлической разверки отдельных циркуляционных петель, а также в случае увеличения паровой нагрузки ПГ сверх номинальных значений. Результаты анализа указывают на перспективность применения ПДЛ с безбарботажными насадками при модернизации сепарационной схемы горизонтального парогенератора блока ВВЭР-1000.

*Оказание консультационных услуг по анализу водно-химического режима, систем измерения уровня в различных режимах эксплуатации, разработка предложений и рекомендаций по выбору оптимального варианта ВКУ ПГ: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук.: Б.Н. Корольков, А.Г. Агеев; исполн. Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2009. — 54 с. — Инв. № 343.09.*

## **Анализ работы системы измерения уровня воды в реакторе, компенсаторе давления, барботере и гидроемкостях САОЗ блоков АЭС с ВВЭР-1000**

*Руководитель работы д-р техн. наук А.Г. Агеев;  
исполнители: канд. техн. наук Р.В. Васильева, инженер Г.Б. Кожаринова*

Представлены результаты анализа работы уровнемеров КД, гидроемкостей САОЗ, барботера и реактора блока I Ростовской АЭС в период освоения проектной мощности. Показано, что:

- проведенные работы по наладке гидростатической части уровнемеров ГЕ САОЗ, КД, барботера и реактора выполнены в полном объеме и

удовлетворяют приемочным критериям программы 320.00.00.00.000 ПМ4;

- базы уровнемеров, их маркировка, прокладка импульсных линий соответствуют проектным требованиям;
- подтверждена работоспособность гидростатической части уровнемеров ГЕ САОЗ, КД, барботера и реактора;

Представлены результаты анализа испытаний уровнемеров КД, барботера и реактора на «холодной» воде и при рабочих параметрах на III блоке Калининской АЭС, проведенных в рамках разработанной для этих целей программы. Показано, что соблюдение всех требований программы испытаний перечисленного оборудования является гарантией его надежного функционирования в процессе дальнейшей эксплуатации. Приведены разработанные и апробированные методики расчета шкал уровнемеров на «холодной» воде и при рабочих параметрах оборудования. Анализ полученных результатов показал, что исследованные системы измерения уровня работоспособны, в целом соответствуют проектным требованиям и обеспечивают нормальную эксплуатацию энергоблока. Результаты испытаний уровнемеров перечисленного оборудования и опыт их проведения рекомендуется использовать на других блоках АЭС с ВВЭР-1000.

*Анализ работы системы измерения уровня воды в реакторе, компенсаторе давления, барботере и гидроемкостях САОЗ блоков АЭС с ВВЭР-1000: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. А.Г. Агеев; исполн.: Р.В. Васильева, Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2009. — 65 с. — Инв. № 344.09.*

### **Экспериментальное исследование эффективности конструкции АДФ для ТВС ВВЭР-1000**

*Руководитель работы инженер В.С. Курсков;*

*исполнители: д-р техн. наук В.А. Гашенко, инженеры О.Н. Абакумова, А.В. Иванов, Н.В. Одинцов, В.М. Кочергин*

Представлены результаты впервые в отечественной практике проведенных экспериментальных (стендовых) исследований эффективности фильтрации и гидравлического сопротивления антидебризных устройств и антидебризного фильтра (АДФ) тепловыделяющей сборки (ТВС) ВВЭР-1000 на второй петле стенда «Фильтр-1» при расходе теплоносителя до 500 м<sup>3</sup>/ч. В качестве АДФ использовалось антидебризное устройство, совмещенное с нижней решеткой (НР) ТВС ВВЭР-1000. Испытаниям подлежали 3 типа нижних решеток: типа «гантель» (МСЗ-ОКБМ), типа «ромашка» (НЗХК – ОКБ ГП) и «упрощенная» НР (МСЗ), совмещенные с различными вариантами антидебризных устройств. Кроме испытаний различных вариантов нижних решеток были проведены экспериментальные исследования плоского АДФ типа «шеvron» разработки ОКБМ – МСЗ на эффективность фильтрации и оценку гидравлического сопротивления как с дебризом, так и без дебриза. При проведении экспериментов был использован дебриз разных

геометрических размеров и из различного материала, наиболее часто присутствующий в основных технологических контурах реальных реакторных установках. Полученные результаты могут быть использованы при принятии решения по промышленному оснащению рабочих кассет ТВС ВВЭР-1000 антидебризными устройствами, совмещенными с нижними решетками.

*Экспериментальное исследование эффективности конструкции АДФ для ТВС ВВЭР-1000: отчёт о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. В.С. Курсков; исполн.: В.А. Гашенко, О.Н. Абакумова, А.В. Иванов, Н.В. Одинцов, В.М. Кочергин. — Электрогорск, 2009. — 55 с. — Инв. 4.827.*

### **Обобщение опытных данных по теплогидравлическим и сепарационным характеристикам парогенератора на повышенной мощности, полученных в испытаниях на стенде В-3 (ПГВ)**

*Руководитель работы д-р техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнитель канд. техн. наук С.М. Никонов*

Представлены результаты обобщения опытных данных по теплогидравлическим и сепарационным характеристикам парогенератора на повышенной мощности, полученных в испытаниях на стенде В-3. На этом стенде была исследована модель парогенератора ПГВ-1000 МКП, предназначенного для АЭС-2006. Были испытаны две модификации погруженного дырчатого листа (ПДЛ) с равномерной перфорацией погруженного листа ( $\psi = 6\%$ ) и ПДЛ с неравномерной перфорацией  $\psi = 4\%$  и  $\psi = 8\%$ . Было выполнено исследование выравнивающей способности ПДЛ с листами с разной степенью перфорации (ПДЛ с равномерной перфорацией и ПДЛ с неравномерной перфорацией), а также исследование сепарационных характеристик модели парогенератора ПГВ-1000 повышенной мощности. Получены новые экспериментальные данные для целей верификации теплогидравлического кода STEG. Результаты работы могут быть использованы для модернизации ПДЛ, а также для верификации теплогидравлических кодов.

*Обобщение опытных данных по теплогидравлическим и сепарационным характеристикам парогенератора на повышенной мощности, полученных в испытаниях В-3: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн. С.М. Никонов. — Электрогорск, 2010. — 51 с. — Инв. № 368.10.*

### **Верификационные расчеты кодом STEG экспериментов ОАО ОКБ «Гидропресс» и ОАО «ЭНИЦ»**

*Руководитель темы д-р физ.-мат.наук В.И. Мелихов;  
исполнители: канд. физ.-мат.наук Ю.В. Парфенов, инженер А.А. Неровнов*

Представлены результаты верификации теплогидравлического кода STEG на опытных данных ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и результаты претестовых расчетов кодом STEG экспериментов ОАО «ЭНИЦ». Они выявили, что объемное паросодержание под ПДЛ близко к единице. Поэтому в экспериментах, проведенных на стенде ОАО «ЭНИЦ», был уменьшен расход пара до 5,5 т/ч, что позволило получить под ПДЛ пароводяную смесь и исследовать

её течение. Представлены результаты верификации теплогидравлического кода STEG на опытных данных, полученных в экспериментах, выполненных в ОАО «ЭНИЦ» на модели парогенератора ПГВ-1000 КП (на стенде ПГВ). В результате верификационных расчетов определены оптимальные корреляции, обеспечивающие адекватное воспроизведение экспериментальных режимов.

*Верификационные расчеты кодом STEG экспериментов ОАО ОКБ «Гидропресс» и ОАО «ЭНИЦ»: отчёт о НИР; рук. В.И. Мелихов; исполн.: Ю.В. Парфенов, инженер А.А. Неровнов. — Электрогорск, 2010. — 55 с. — Инв. № 370.10.*

### **Исследование гидравлических характеристик макетов рабочих кассет третьего поколения с различными способами крепления твэлов**

*Руководитель работы инженер В.С. Курсков;*

*исполнители: д-р техн. наук В.А. Гашенко, инженеры О.Н. Абакумова, А.В. Иванов, Н.В. Одинцов, В.М. Кочергин*

Представлены результаты сравнительных гидравлических испытаний макета ТВС ВВЭР-440 третьего поколения (РК-3) с различными вариантами крепления твэлов, полученные на первой петле стенда «Фильтр-1» при расходе теплоносителя до 150 м<sup>3</sup>/ч. В качестве макета ТВС использовался штатный укороченный макет уголковой ТВС с нижней решеткой и двумя дистанционирующими решетками. Испытаниям подлежали три варианта крепления твэлов:

- твэлы закреплены в нижней решетке — штатный вариант;
- твэлы имеют зазор относительно нижней решетки — без крепления твэлов в нижней решетке;
- часть твэлов закреплена сверху, часть твэлов с опорой снизу.

Полученные результаты могут быть использованы при принятии решений по изменению конструкции РК-3 ВВЭР-440 в части крепления твэлов с целью улучшения ее термомеханических и физических характеристик.

*Исследование гидравлических характеристик макетов рабочих кассет третьего поколения с различными способами крепления твэлов: отчёт о НИР/ОАО «ЭНИЦ»; рук. В.С. Курсков; исполн.: В.А. Гашенко, О.Н. Абакумова, А.В. Иванов, Н.В. Одинцов, В.М. Кочергин. — Электрогорск, 2010. — 26 с. — Инв. № 4.829.*

### **Анализ результатов динамических испытаний систем измерения уровня воды в различных режимах эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000**

*Руководитель работы д-р техн. наук А.Г. Агеев;*

*исполнители канд. техн. наук Б.Н. Корольков, инженер Г.Б. Кожаринова*

В работе приведены результаты комплексных исследований парогенераторов ПГВ-1000 в стационарных и переходных режимах на ХмАЭС и НВ АЭС. Исследования включают в себя опыты при сбросе нагрузки, отключении ПТН, ГЦН, режимы срабатывания АЗ. В стационарных режимах не обнаружено никаких аномалий, ухудшающих надежность ПГ.

В стационарных режимах и при малых возмущениях система регулирования питания поддерживает уровень в ПГ с требуемой точностью. В переходных режимах, а также при отклонениях от режима нормальной эксплуатации (отключение ГЦН, ПТН), наблюдается изменение уровня воды, превышающее заданный диапазон регулирования. Для улучшения качества регулирования целесообразно использовать сигнал по расходу пара в качестве задающего по тепловой нагрузке парогенераторов.

Показана (обоснована и экспериментально подтверждена) возможность использования в качестве датчиков расхода пара пневмометрических трубок специальной конструкции. В частности, на ПГ-1, ПГ-2, ПГ-3 и ПГ-4 III блока Бал. АЭС проведены испытания системы измерения расхода пара с использованием таких трубок и показана ее работоспособность при стационарных и переходных режимах работы блока.

*Анализ результатов динамических испытаний систем измерения уровня воды в различных режимах эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. А.Г. Агеев; исполн.: Б.Н. Корольков, Г.Б. Кожаринова. — Электротгорск, 2010. — 45 с. — Инв. № 350.10.*

### **Анализ результатов сепарационных гидродинамических испытаний парогенераторов ПГВ-1000 М с ПДЛ, оборудованными безбарботажными инерционными насадками**

*Руководитель работы канд. техн. наук Б.М. Корольков;  
научный руководитель темы д-р техн. наук А.Г. Агеев;  
исполнитель инженер Г.Б. Кожаринова*

Рассмотрена возможность применения в сепарационной схеме парогенератора ПГВ-1000 погруженного дырчатого листа, оснащенного безбарботажными инерционными насадками, отводящими пар из паровой «подушки» непосредственно в паровой объем выше уровня воды. Представлены результаты выполненного анализа данных испытаний элементов ПДЛ с насадками различного диаметра, проведенных на стендах ОАО «ЭНИЦ» и ОАО ОКБ «Гидропресс», из которого следует, что применение в сепарационной схеме парогенератора ПДЛ с насадками обеспечивает увеличение паровой нагрузки более, чем в два раза по сравнению со штатной сепарационной схемой, а также повышение предельного положения уровня воды над ПДЛ с 200 мм — для штатной схемы — до 500 мм. Показана целесообразность проведения испытаний парогенератора, оснащенного ПДЛ с безбарботажными насадками, на блоках ВВЭР-1000. Выполнен анализ опытных данных испытаний парогенератора блока I Хмельницкой АЭС с модернизированной системой водопитания и продувки и оборудованного ПДЛ с безбарботажными инерционными насадками диаметром 80 мм. Показано, что в диапазоне изменения уровня по уровнемеру L19 от 2330 до 2570 мм влажность пара в паропроводе составляет не более 0,1%. При этом, влажность пара на входе в жалюзи также менее 0,1%, что подтверждает целесообразность замены

жалюзи потолочным дырчатым щитом. Показано, что в парогенераторе, оснащенном ПДЛ с насадками, имеется возможность повышения уровня над ПДЛ до 300 мм, что от 60 до 80 мм выше, чем для штатного варианта ПГ. Результаты испытаний полностью корреспондируются с полученными ранее на стендах ОАО «ЭНИЦ» и ОАО ОКБ «Гидропресс». Выполнен анализ сепарационных испытаний штатного парогенератора ПГ-2 и парогенератора ПГ-3, оснащенного ПДЛ с насадками, блока I Волгодонской АЭС при номинальной мощности. Показано, что применение ПДЛ с насадками в сепарационной схеме ПГ позволяет существенно увеличить диапазон допустимого изменения уровня над ПДЛ до 300 мм, что позволяет рассмотреть возможность поддержания уровня в ПГ по показаниям уровнемера, измеряющего уровень над ПДЛ и непосредственно влияющего на вынос влаги и надежность работы турбоустановки. Даны рекомендации по нормализации процессов паросепарации в ПГ-3 при низких уровнях воды. Отмечена целесообразность проведения исследований гидродинамических и сепарационных процессов в зоне «холодного» торца модернизированных ПГ без жалюзи со штатным ПДЛ и ПДЛ с насадками. Подтверждена эффективность применения ПДЛ с безбарботажными насадками в сепарационной схеме парогенератора блока ВВЭР-1000.

*Анализ результатов сепарационных гидродинамических испытаний парогенераторов ПГВ-100 М с ПДЛ, оборудованными безбарботажными инерционными насадками: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук.: Б.М. Корольков, А.Г. Агеев; исполн. Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2010. — 73 с. — Инв. № 362.10.*

### **Анализ температурного режима теплообменных труб и коллекторов теплоносителя в стационарных и переходных режимах эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000**

*Руководитель работы д-р техн. наук А.Г. Агеев;*

*исполнители: канд. техн. наук Б.М. Корольков, инженер Г.Б. Кожаринова*

Приведены результаты анализа данных измерений температуры поверхности теплообменного пучка и котловой воды парогенераторов ПГВ-1000 в стационарных и переходных режимах работы блока в диапазоне изменения электрической мощности от МКУ до номинальных значений. Измерение температур выполнялось с помощью микротермопар, установленных в зоне раздачи питательной воды, а также вблизи «горячего» и «холодного» коллекторов теплоносителя. Переходные режимы включали в себя ступенчатое повышение и снижение мощности, изменение уровня в рабочих пределах, отключение и подключение ПВД, отключение ГЦН, срабатывание АЗ. В стационарных режимах не обнаружено каких-либо аномалий, ухудшающих надежность работы ПГ. При нагрузках приблизительно до 50% от номинала в зоне раздачи питательной воды отмечены пульсации температуры стенки верхних рядов теплообменных трубок, связанные с периодическим проникновением питательной воды к поверхности трубок.

Увеличение тепловой нагрузки приблизительно до 75% от номинала приводит к уменьшению пульсаций и стабилизации температурного режима трубок. При номинальной нагрузке восходящий поток пара полностью блокирует попадание капель недогретой воды на верхние ряды теплообменных трубок. Определена предельная величина уровня, при которой на верхних рядах трубок сохраняется нормальная теплоотдача при кипении. Во всех переходных режимах имеет место стабильный температурный режим теплообменных трубок без признаков ухудшения теплообмена. Выполненный анализ свидетельствует о нормальной работе теплообменной поверхности ПГ и об отсутствии недогрева котловой воды до температуры насыщения вблизи «холодного» коллектора теплоносителя как в стационарных, так и в переходных режимах работы блока.

*Анализ температурного режима теплообменных труб и коллекторов теплоносителя в стационарных и переходных режимах эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. А.Г. Агеев; исполн.: Б.М. Корольков, Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2010. — 72 с. — Инв. № 361.10.*

### **Анализ результатов теплотехнических испытаний парогенераторов блоков ВВЭР-1000 после реконструкции системы водопитания и продувки**

*Научный руководитель темы д-р техн. наук А.Г. Агеев;  
руководитель работы канд. техн. наук Б.Н. Корольков;  
исполнитель инженер Г.Б. Кожаринова*

Приведены результаты анализа теплогидравлических расчетов циркуляционных характеристик парогенератора ПГВ-1000 с модернизированной системой водопитания. Цель модернизации — увеличение кратности циркуляции в наиболее теплонапряженной зоне ПГ вблизи «горячего» коллектора для уменьшения отложений шлама. Проанализированы различные схемы раздачи питательной воды. Определен характер распределения растворимых примесей и скорость образования отложений на теплообменном пучке. Выполненные расчетные оценки показали, что:

- кратность циркуляции вблизи «горячего» коллектора может быть увеличена путем подачи части воды непосредственно в «опускной» коридор, при этом необходимый расход ее составляет приблизительно 50 т/ч на погонный метр длины коридора;
- ожидаемое увеличение кратности циркуляции составляет 1,5–2 раза по сравнению со штатной схемой раздачи питательной воды;
- показано, что подача питательной воды непосредственно в опускные каналы с целью конденсации пара, интенсификации циркуляции и повышения эффективности удаления шлама не оказывает негативного влияния на распределение примесей.

Приведены результаты анализа результатов теплотехнических испытаний ПГ с модернизированной системой водопитания, предусматривающей

подачу части питательной воды в «опускной» «горячий» коридор. Показано, что при номинальной мощности блока кратность циркуляции вблизи «горячего» коллектора в ПГ с модернизированной системой водопитания приблизительно на 40% выше, чем в ПГ штатного исполнения, что согласуется с расчетными оценками, выполненными ОАО «ЭНИЦ» и ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Проанализированы результаты теплотехнических испытаний ПГ с вышеупомянутой модернизированной системой водопитания и реконструированной системой продувки, позволяющей отдельно продувать «карманы» коллекторов теплоносителя первого контура, и ПГ в варианте без разделения линий продувки из «карманов» коллекторов и днища ПГ. Показано, что суммарное количество железооксидных соединений, выносимых с водой при периодической продувке из ПГ с разделенной продувкой «карманов» и днища, примерно на 10% больше, чем из ПГ без разделения линий продувки «карманов» и днища. Проанализирована эпюра распределения солей и железооксидных соединений в водяном объеме ПГ. Показано, что характер распределения солей натрия и окислов железа качественно соответствует расчетному, что свидетельствует о правомерности физических предположений, заложенных в модель расчета распределения примесей по объему парогенератора. Подтверждена хорошая воспроизводимость результатов идентичных испытаний как в части циркуляции потока, так и в части распределения солей и железа в объеме ПГ при различных вариантах организации продувки. Достоверный характер полученных экспериментальных результатов и выявленные преимущества предложенных мероприятий по модернизации системы водопитания ПГ по сравнению с ПГ штатной конструкции позволяют рекомендовать предложенные конструктивные решения для внедрения на парогенераторах блоков АЭС с ВВЭР-1000.

*Анализ результатов теплотехнических испытаний парогенераторов блоков ВВЭР-1000 после реконструкции системы водопитания и продувки: отчет о НИР/ОАО «ЭНИЦ»; рук.: А.Г. Агеев, Б.Н. Корольков; исполн. Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2010. — 86 с. — Инв.№ 365.10.*

### **Анализ возможных путей повышения нагрузки парогенератора блока ВВЭР-1000**

*Руководитель темы д-р техн. наук А.Г. Агеев;  
руководитель работы канд. техн. наук Б.М. Корольков;  
исполнитель инженер Г.Б. Кожаринова*

Представлены результаты анализа работы штатной сепарационной схемы парогенератора ПГВ-1000 с предварительной гравитационной сепарацией влаги в паровом объеме и окончательной осушкой в жалюзийном сепараторе. Показано, что запас по паропроизводительности таких парогенераторов не превышает 5–7 %, что приблизительно соответствует теплогидравлической неравномерности циркуляционных петель. Поэтому существенное увеличение их паропроизводительности выше номинала не

представляется возможным. Представлены результаты расчетного обоснования сепарационной схемы ПГВ-1000 без жалюзийного сепаратора с погруженным и пароприемным щитами. Расчетный запас по паропроизводительности таких парогенераторов существенно увеличивается и достигает гарантированно 10 % от номинала. Показано, что дальнейшее улучшение сепарационных характеристик и повышение нагрузки парогенераторов возможно за счет применения погруженного дырчатого листа (ПДЛ) с переменной перфорацией, учитывающей неравномерность тепловыделений после теплообменного пучка, а также за счет использования ПДЛ принципиально новой конструкции с безбарботажными инерционными насадками, исключающего набухание уровня в ПГ. Представлены конкретные мероприятия и предложения по модернизации с этой целью ВКУ ПГВ-1000.

*Анализ возможных путей повышения нагрузки парогенератора блока ВВЭР-1000: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук.: А.Г. Агеев, Б.М. Корольков; исполн. Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2010. — 64 с. — Инв. № 377.10.*

### **Обобщение результатов проекта ТАСИСR2. 01/99 (часть А), посвященного квалификации барботажно-вакуумной системы локализации аварий для 3 блока Кольской АЭС на крупномасштабном интегральном стенде БК В-213**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Мелихов;  
исполнители: канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфенов, С.Е. Якуш,  
инженер М.В. Давыдов*

В соответствии с Контрактом 30343 (Часть А) между Европейским сообществом и Электрогорским научно-исследовательским центром по безопасности АЭС был реализован проект «Экспериментальные исследования на экспериментальном стенде БК В-213 (R2.01/99)» в ОАО «ЭНИЦ» г. Электрогорск. ОАО «ЭНИЦ» выполнил следующие работы: ремобилизация экспериментального стенда; проведение эксперимента, выполненного в ходе проекта РН 2.13/95, для проверки работоспособности стенда; пост-тестовый анализ этого эксперимента; модификация экспериментального стенда применительно к испытаниям для Кольской АЭС; подготовка плана проведения экспериментов и выполнение претестовых расчетов; выполнение экспериментов; пост-тестовый анализ всех выполненных экспериментов. Полученные экспериментальные результаты подтвердили работоспособность барботажно-вакуумной системы во время аварий с большой и малой течью и аварии с разрывом паропровода. Максимальные нагрузки были достигнуты в случае аварии с большой течью (LBLOCA). Конденсационных осцилляций не наблюдалось. С помощью кода СОСОSYS был выполнен анализ максимальной проектной аварии для 3-го блока Кольской АЭС. Вследствие особенностей конфигурации Кольской АЭС (удвоенное число обратных клапанов) полученный уровень давления в герметичных помещениях находится ближе к максимальной

проектной величине данного параметра, чем в случае других АЭС с реакторами ВВЭР-440/В-213.

*Обобщение результатов проекта ТАСИСR2 01/99 (часть А), посвященного квалификации барботажно-вакуумной системы локализации аварий для 3 блока Кольской АЭС на крупномасштабном интегральном стенде БК В-213: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн.: Ю.В. Парфенов, С.Е. Якуш, М.В. Давыдов. — Электрогорск, 2010. — 124 с. — Инв. № 366.10.*

### **Обобщение результатов проекта ТАСИСR2 03/97 посвященного верификации процедур управления авариями на АЭС с ВВЭР-1000 на крупномасштабном интегральном стенде ПСБ-ВВЭР**

*Руководитель работы д-р техн. наук И.В. Ёлкин; исполнители: д-р техн. наук В.И. Мелихов, канд. техн. наук С.М. Никонов, канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфенов*

Представлены обобщенные результаты проекта ТАСИСR2 03/97, посвященного верификации процедур управления авариями на АЭС с ВВЭР-1000 на крупномасштабном интегральном теплофизическом стенде ПСБ-ВВЭР. Представлены структура и состав комплекса аварийных процедур энергоблоков Балаковской АЭС. Подробно рассмотрены процедуры Инструкции по ликвидации аварий (ИЛА) и Руководства по управлению запроектными авариями (РУЗА). Дано описание основных стратегий управления запроектными авариями, реализованных в ИЛА и РУЗА. Проведено сравнение процедур ИЛА и РУЗА с симптомно-ориентированными аварийными процедурами фирмы Вестингхауз. Даны рекомендации по пополнению состава аварийных процедур энергоблоков Балаковской АЭС. Разработана база данных по экспериментам на крупномасштабном интегральном стенде ПСБ ВВЭР для задач валидации расчетных кодов улучшенной оценки для обоснования процедур управления авариями на АЭС с ВВЭР-1000, а также анализ опытных данных, полученных после проведения экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР.

*Обобщение результатов проекта ТАСИСR2 03/97 посвященного верификации процедур управления авариями на АЭС с ВВЭР-1000 на крупномасштабном интегральном стенде ПСБ-ВВЭР: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: В.И. Мелихов, С.М. Никонов, Ю.В. Парфенов. — Электрогорск, 2010. — 105 с. — Инв. № 367.10.*

### **Обобщение опытных данных по теплогидравлическим и сепарационным характеристикам парогенератора на повышенной мощности, полученных в испытаниях на стенде В-3 (ПГВ)**

*Руководитель работы д-р техн. наук И.В. Ёлкин; исполнитель канд. техн. наук С.М. Никонов*

Представлены результаты обобщения опытных данных по теплогидравлическим и сепарационным характеристикам парогенератора на повышенной мощности, полученных в испытаниях на стенде В-3. На этом стенде была исследована модель парогенератора ПГВ-1000 МКП,

предназначенного для АЭС-2006. Были испытаны две модификации погруженного дырчатого листа (ПДЛ): с равномерной перфорацией ( $\psi = 6\%$ ) и с неравномерной перфорацией  $\psi = 4\%$  и  $\psi = 8\%$ . Было выполнено исследование выравнивающей способности ПДЛ с листами с разной степенью перфорации (ПДЛ с равномерной перфорацией и ПДЛ с неравномерной перфорацией), а также исследование сепарационных характеристик модели парогенератора ПГВ-1000 повышенной мощности. Результаты работы могут быть использованы для модернизации ПДЛ, а также для верификации теплогидравлических кодов.

*Обобщение опытных данных по теплогидравлическим и сепарационным характеристикам парогенератора на повышенной мощности, полученных в испытаниях В-3: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн. С.М. Никонов. — Электрогорск, 2010. — 51 с. — Инв. № 368.10.*

### **Описание экспериментов по исследованию выравнивающей способности ПДЛ на стенде ОАО «ЭНИЦ»**

*Руководитель темы д-р техн. наук А.Г. Агеев;*

*исполнители: канд. техн. наук Р.В. Васильева, д-р техн. наук И.В. Ёлкин, канд. техн. наук С.М. Никонов*

Ранее в ОАО «ЭНИЦ» были выполнены экспериментальные исследования, целью которых являлось исследование на стенде ПГВ выравнивающей способности ПДЛ с пластинами с разной степенью перфорации. Полученные экспериментальные данные внесли существенный вклад в понимание влияния ПДЛ с разной перфорацией на процессы сепарации в ПГВ. Однако анализ экспериментальных данных показал, что требуется продолжение исследований в части изучения влияния раздачи пара из парораздающего коллектора на гидродинамическую картину течения двухфазной смеси в ПГВ. Для этих целей выполнена модернизация системы раздачи пара с тем, чтобы на установке более точно воспроизводились теплогидравлические условия, соответствующие «горячей» и «холодной» половинам ПГВ. На модернизированной экспериментальной установке проведены эксперименты по исследованию теплогидравлических и сепарационных процессов при работе парогенератора на повышенной мощности для различных вариантов перфорации ПДЛ. Экспериментальное исследование выполнено при параметрах рабочей среды, соответствующих натурным параметрам парогенератора: давлению 7 МПа, интервале паровых нагрузок от 7,5 до 10 т/ч, положении массового уровня от отметки ПДЛ от 0 до 250 мм. Представлено описание стенда, модели поперечной вырезки натурального парогенератора ПГВ-1000МКП, методики проведения испытаний, результаты экспериментальных исследований.

*Описание экспериментов по исследованию выравнивающей способности ПДЛ на стенде ОАО «ЭНИЦ»: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. А.Г. Агеев; исполн.: Р.В. Васильева, И.В. Ёлкин, С.М. Никонов. — Электрогорск, 2010. — 35 с. — Инв. № 369.10.*

## **Верификационные расчеты кодом STEG экспериментов**

### **ОАО ОКБ «Гидропресс» и ОАО «ЭНИЦ»**

*Руководитель темы д-р техн. наук В.И. Мелихов;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфенов, инженер А.А. Неровнов*

Представлены результаты верификации теплогидравлического кода STEG на опытных данных ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и результаты претестовых расчетов кодом STEG экспериментов ОАО «ЭНИЦ». Они выявили, что объемное паросодержание под ПДЛ близко к единице. Поэтому в экспериментах, проведенных на стенде ОАО «ЭНИЦ», был уменьшен расход пара до 5,5 т/ч, что позволило получить под ПДЛ пароводяную смесь и исследовать её течение. Представлены результаты верификации теплогидравлического кода STEG на опытных данных, полученных в экспериментах, выполненных в ОАО «ЭНИЦ» на модели парогенератора ПГВ-1000 КП (на стенде ПГВ). В результате верификационных расчетов определены оптимальные корреляции, обеспечивающие адекватное воспроизведение экспериментальных режимов.

*Верификационные расчеты кодом STEG экспериментов ОАО ОКБ «Гидропресс» и ОАО «ЭНИЦ»: отчёт о НИР; рук. В.И. Мелихов; исполн.: Ю.В. Парфенов, А.А. Неровнов. — Электрогорск, 2010. — 55 с. — Инв. № 370.10.*

## **Работы применительно к РБМК**

### **Разработка методологии поиска наихудших условий развития аварийного процесса, инициированного разрушением одиночного технологического канала. Разработка математических моделей нагрева, деформирования и разрушения канальной трубы при осесимметричном нагружении**

*Руководители работы: канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева,*

*от ИМП РАН — д-р физ.-мат. наук Р.В. Гольдштейн;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук А.В. Андреев,*

*от ИПМ РАН — канд. техн. наук Н.М. Осипенко,*

*канд. физ.-мат. наук Ю.В. Житников*

Разработан и описан алгоритм поиска наиболее опасных сценариев возможного множественного разрушения топливных каналов реактора типа РБМК под действием совокупности факторов силового воздействия и изменения свойств материалов при радиационном старении.

*Разработка методологии поиска наихудших условий развития аварийного процесса, инициированного разрушением одиночного технологического канала. Разработка математических моделей нагрева деформирования и разрушения канальной трубы при осесимметричном нагружении: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук.: Н.Ю. Медведева, Р.В. Гольдштейн; исполн.: А.В. Андреев, Н.М. Осипенко, Ю.В. Житников. — Электрогорск, 2001. — 37 с. — Инв. № 6.617.*

## **Расчетно-экспериментальный анализ термомеханического поведения трубы ТК РБМК с графитовыми элементами в условиях аварии типа ЛОСА**

*Руководитель работы канд. техн. наук В.Д. Локтионов;*

*исполнители: инженер О.Н. Абакумова, д-р техн. наук В.А. Гашенко,*

*канд. физ.-мат. наук И.И. Шмаль, инженеры Н.И. Ярошенко,*

*А.В. Саломатов, А.А. Пыжов, Н.В. Тимкина, А.М. Берестов, М.А. Берестов*

Проведено расчетно-экспериментальное исследование термомеханического поведения макета топливного канала (ТК) реактора РБМК, состоящего из штатной необлученной циркониевой трубы из сплава Zr-2,5% Nb и графитовых элементов (кольца и блоки), в условиях быстрого (более 6 К/с) косвенного разогрева при давлении внутри исследуемой трубы ТК 6,2–6,9 МПа. Разрушение макета ТК произошло в области наиболее нагретого сечения трубы. При этом впервые в отечественной практике:

- измерены температуры на внутренней поверхности трубы ТК, давшие возможность оценить реальные градиенты температуры по толщине ее стенки при аварийном разогреве и продольные деформации трубы в процессе ее нагрева;
- установлено, что графитовый блок после посадки на него трубы ТК сохранял свою несущую способность в течение 60 с при давлении в ТК более 6,0 МПа. Разрушение его произошло после исчерпания несущей способности канальной трубы макета. Полученные результаты могут быть использованы при верификации расчетных термомеханических кодов, предназначенных для моделирования одиночного и множественного разрывов ТК РБМК.

*Расчетно-экспериментальный анализ термомеханического поведения трубы ТК РБМК с графитовыми элементами в условиях аварии типа ЛОСА: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.Д. Локтионов; исполн.: О.Н. Абакумова, В.А. Гашенко, И.И. Шмаль и др. — Электрогорск, 2001. — 70 с. — Инв. № 4.613.*

## **Разработка, расчетно-аналитическое обоснование и испытание элементов оборудования для стенда ПСБ РБМК**

*Руководитель канд. техн. наук Н.А. Брус;*

*исполнители: д-р техн. наук Э.А. Болтенко, канд. техн. наук А.С. Зуйков,*

*А.А. Прокопенков, инженеры О.Е. Юсупов, И.И. Дорофеев*

Объектом исследования является полномасштабный стенд безопасности ПСБ РБМК. Цель работы:

- разработка, расчетно-аналитическое обоснование и испытания элементов оборудования для стенда;
- разработка программы экспериментальных исследований на стенде ПСБ РБМК.

Представлены следующие материалы:

- общая информация по стенду ПСБ РБМК (принципиальные схемные решения, описание элементов оборудования);

- результаты расчетов, выполненных в обоснование возможных экспериментальных режимов;
- предлагаемый перечень экспериментальных исследований для стенда ПСБ РБМК;
- результаты НИР и ОКР по разработке, изготовлению опытных образцов и испытанию элементов оборудования для стенда ПСБ РБМК;
- работы по созданию нестандартных систем измерения для стенда.

Основной объем необходимых теплогидравлических расчетов выполнен кодом RELAP5/MOD3.2. Испытания опытных образцов имитаторов твэл проводились в ЭНИЦ на стенде БОС. Проведенные испытания показали работоспособность предложенной конструкции имитаторов твэл.

*Разработка, расчетно-аналитическое обоснование и испытание элементов оборудования для стенда ПСБ РБМК: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. Н.А. Брус; исполн.: Э.А. Болтенко, А.С. Зуйков, А.А. Прокопенков и др. — Электрогорск, 2001. — 219 с. — Инв. № 3.612.*

### **Моделирование истечения теплоносителя из разрыва технологического канала на стенде ТКР-ФС с помощью кода RELAP** *Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов;* *исполнитель инженер А.В. Соколин*

Представлены результаты расчетного анализа теплогидравлическим кодом RELAP5 процесса истечения пара из разрыва имитатора аварийного ТК на стенде ТКР-Ф. В расчетах моделировалось истечение теплоносителя (пара) из разрыва в технологическом канале стенда ТКР-Ф. В первом расчете моделировался эксперимент с двусторонним разрывом ТК с учетом подачи теплоносителя в ТК. Во втором — аналогичный эксперимент с полным прекращением подачи теплоносителя в ТК. Результаты показали слабое влияние наличия подачи теплоносителя в рабочий участок стенда на начальной стадии эксперимента в случае максимальной течи через разрыв. Проведенные расчеты выявили, что в случае максимального расхода через разрыв избыточное давление в защитном кожухе (11 кПа) превысило максимально допустимое значение (5 кПа), что может привести в эксперименте к его разрушению или деформации. Результаты расчетов будут использоваться в дальнейшем, в качестве начальных и граничных условий при трехмерном численном моделировании истечения теплоносителя из разрыва ТК, в рамках проекта «Разработка системы кодов для анализа термомеханических и теплофизических процессов в активной зоне РБМК, связанных с разрушением технологических каналов».

*Моделирование истечения теплоносителя из разрыва технологического канала на стенде ТКР-ФС с помощью кода RELAP: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. В.И. Мелихов; исполн. А.В. Соколин. — Электрогорск, 2001. — 28 с. — Инв. № 13.583.*

## **Анализ теплогидравлических процессов на стенде ТКР с помощью кода RELAP.**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов;  
исполнители: инженеры О.В. Гавритенкова, А.В. Соколин*

Представлены результаты расчетного анализа теплогидравлическим кодом RELAP5 процесса истечения пароводяной смеси из разрыва имитатора аварийного технологического канала стенда ТКР. Результаты анализа показали слабое влияние тепловых потерь от подводящих трубопроводов на процесс истечения. Из этого следует отсутствие необходимости в теплоизоляции этих подводящих трубопроводов. Результаты расчетов показывают значительное различие теплофизических параметров среды в имитаторе аварийного технологического канала и в водоприготовительном устройстве, что связано с большими гидравлическими потерями. Отмечается, что результаты проведенного анализа выявили наличие значительных гидроударов в подводящих трубопроводах при данной методике проведения экспериментов, что может представлять опасность для целостности стенда.

*Анализ теплогидравлических процессов на стенде ТКР с помощью кода RELAP: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Мелихов; исполн.: О.В. Гавритенкова, А.В. Соколин. — Электрогорск, 2001. — 36 с. — Инв. № 13.584.*

## **Разработка математических моделей нагрева и деформирования канальной трубы при неосесимметричном нагружении, разработка моделей истечения парожидкостной среды в разрыве. Расчетное моделирование процессов нагрева, деформирования и истечения**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева;  
исполнители: канд. физ.-мат. наук А.В. Андреев,  
канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов, инженер А.В. Соколин,  
от Института проблем механики (ИПМ) РАН —  
д-р физ.-мат. наук Р.В. Гольдштейн, канд. физ.-мат. наук Ю.В. Житников*

Разработаны физико-механические и расчетные модели нагрева, деформирования и разрушения трубы на стенде ТКР-Ф в неосесимметричной постановке без учета влияния графитовой кладки.

*Разработка математических моделей нагрева и деформирования канальной трубы при неосесимметричном нагружении, разработка моделей истечения парожидкостной среды в разрыве. Расчетное моделирование процессов нагрева, деформирования и истечения: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: А.В. Андреев, В.И. Мелихов, А.В. Соколин, Р.В. Гольдштейн, Ю.В. Житников. — Электрогорск, 2002. — 53 с. — Инв. № 6.616.*

### **Проведение экспериментов на стенде ТКР-Ф**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева;  
исполнители: канд. техн. наук А.А. Пешков,  
канд. физ.-мат. наук А.В. Андреев, д-р техн. наук В.И. Юхвид,  
канд. техн. наук В.Н. Санин, В.А. Горшков*

В работе представлены претестовые расчеты по стенду ТКР-Ф и основные результаты разработки термитного нагревателя. Дано описание и приведены результаты по десяти пускам стенда ТКР-Ф, проведенным в рамках «Программы комплексного опробования оборудования, подготовки и проведения экспериментов с предполагаемым разрывом модели аварийного канала» ТКР-Ф.35.00.00.00.П. Сделан вывод о готовности стенда ТКР-Ф к вводу в эксплуатацию — параметры стенда позволяют создавать условия, при которых происходит разрыв циркониевой трубы. Разогрев трубы проводился термохимическим нагревателем разработки ИСМАН (г. Черноголовка). В эксперименте произошел разрыв фрагмента канальной трубы из циркониевого сплава. Представлены также результаты верификационных расчетов напряженно-деформированного состояния трубы.

*Проведение экспериментов на стенде ТКР-Ф: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: А.А. Пешков, А.В. Андреев, В.И. Юхвид, В.Н. Санин, В.А. Горшков. — Электрогорск, 2002. — 74 с. — Инв. № 6.621.*

### **Расчетный анализ по обоснованию сепарационной схемы парогенератора ПГВ-1000 с помощью кода STEG**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов;  
исполнитель канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфенов*

Представлены проведенные с помощью трехмерного кода STEG расчеты теплогидравлических характеристик и процессов солераспределения и отложения примесей в горизонтальном парогенераторе ПГВ-1000 с коридорной компоновкой трубного пучка и выполнено сопоставление их с результатами, полученными для парогенератора с шахматной компоновкой трубного пучка. Установлено, что качественная картина течения пароводяной смеси примерно одинакова в обоих случаях. Расчетами показано, что питательная вода, которая подается над трубчаткой, поступает в трубные пакеты, в основном стекая вниз по боковым зазорам между трубчаткой и корпусом парогенератора, а также в торцах парогенератора. В коридоры из-за сильного подъемного течения пара поступление питательной воды затруднено. В центральном коридоре почти по всей длине парогенератора имеет место восходящее течение пароводяной смеси, в боковых коридорах наблюдается нерегулярное (подъемное/опускное) течение. Вблизи холодного коллектора, из-за низкой тепловой нагрузки, опускное течение возникает даже в холодном боковом пакете. Вследствие более низкого гидравлического сопротивления трубчатки в парогенераторе с коридорным пучком развиваются более высокие скорости пароводяной смеси, что приводит к уменьшению паровой

подушки под ПДЛ, большему выносу воды на ПДЛ и более высокой влажности пара. Сопоставление результатов расчета распределения примесей в водяном объеме ПГ-1000 для шахматного и коридорного трубных пучков показывает, что в случае шахматного пучка содержание примесей в водяном объеме и поверхностная концентрация отложений на трубчатке в области коллекторов ПГ несколько выше, чем в случае коридорного пучка, откуда следует, что использование коридорного пучка в парогенераторе ПГ-1000 будет способствовать локализации примесей в зоне холодного торца ПГ.

*Расчетный анализ по обоснованию сепарационной схемы парогенератора ПГВ-1000 с помощью кода STEG: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. В.И. Мелихов, исполн. Ю.В. Парфенов. — Электрогорск, 2002. — 132 с. — Инв. № 13.633.*

**Комплекс стендов ТКР. Исследовательские эксперименты 04.12.01, 23.03.02, 24.06.02 с разрушением одиночной канальной трубы на стенде ТКР-Ф. эксперименты по изгибу одиночной канальной трубы на стенде ТКР-М. Математическое моделирование. Стенд ТКР-Ф (графит) для изучения процессов течения теплоносителя и теплообмена в зазорах графитовой кладки РБМК**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева; исполнители: канд. техн. наук И.А. Пешков, инженер С.В. Тимкин, канд. физ.-мат. наук А.В. Андреев, канд. техн. наук В.Н. Жилко, инженеры А.С. Сергеев, О.А. Поштовая*

К 2002 году в ЭНИЦ введены в эксплуатацию два маломасштабных стенда: ТКР-Ф для изучения процесса деформирования и разрушения одной канальной трубы в графитовой кладке и стенд ТКР-М для изучения процессов деформирования и взаимодействия пакета графитовых колонн при статических и динамических нагрузках. В том же году проведены 2 исследовательских эксперимента на стенде ТКР-Ф по моделированию разрыва топливного канала реактора РБМК в аварии с потерей теплоносителя. Представлены результаты проведенных экспериментов, подтвердивших возможность создавать на стенде ТКР-Ф термомеханические условия, приводящие к разрыву канальной трубы: оказалось возможным создать достаточно высокий темп нагрева трубы (от 13 до 20°С/с) и достичь необходимого для разрыва уровня разогрева (приблизительно 700°С). Подчеркивается, что механизм разогрева трубы на стенде полностью аналогичен механизму разогрева канальной трубы реактора при прекращении подачи теплоносителя: теплообмен излучением через паровой зазор между разогретым до высокой температуры нагревателем и внутренней поверхностью трубы и конвекция пара в зазоре. Обнаружилось, что в пространстве, окружающем разрывающуюся трубу, возникают локальные по направлению и близкие к ударным по интенсивности скачки давления.

Для расчетного сопровождения и планирования экспериментальных исследований на стенде ТКР-Ф разработаны математические модели,

позволяющие рассчитывать температуру, критическое давление, время до разрушения от момента начала воздействия источника нагрева при различных геометрических, теплофизических и механических параметрах эксперимента. Представлены результаты первой серии экспериментов на стенде ТКР-М, представляющем собой модель ряда из пяти ТК РБМК в графитовой кладке в масштабе 1:6,47.

В экспериментах исследовалось поведение модели одиночной канальной трубы без графитовой колонны под действием статической нагрузки. В процессе проведения экспериментов выполнены проверка и отладка средств измерения, используемых на стенде, разработано и отлажено программное обеспечение для сбора и обработки полученной информации. Представлен разработанный проект стенда ТКР-Ф (графит), предназначенного для изучения процессов течения теплоносителя по зазорам графитовой кладки после его истечения из разорвавшегося канала. Обоснованы техническая возможность и условия проведения модельных испытаний на стенде, обеспечивающих равенство критериев подобия. Показано, что при соблюдении на стенде ТКР-Ф (графит) и в кладке РБМК приближенного геометрического подобия, равенства параметров пароводяной смеси на входе в щель между блоками, равенства начальной скорости движений смеси и равенства плотностей теплового потока, по результатам модельных испытаний можно оценить для кладки реактора как величину гидравлического сопротивления, так и интенсивность теплообмена. При этом моделирование должно осуществляться в щелях реальных размеров, а прогнозирование интенсивности теплообмена в кладке реактора может производиться ступенчато по элементам кладки на длину, не превышающую два блока.

*Комплекс стендов ТКР. исследовательские эксперименты 04.12.01, 23.03.02, 24.06.02 с разрушением одиночной канальной трубы на стенде ТКР-Ф. эксперименты по изгибу одиночной канальной трубы на стенде ТКР-М. Математическое моделирование. Стенд ТКР-Ф (графит) для изучения процессов течения теплоносителя и теплообмена в зазорах графитовой кладки РБМК: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: И.А. Пешков, С.В. Тимкин, А.В. Андреев и др. — Электрогорск, 2002. — 185 с. — Инв. № 6.637.*

## **Разработка сценариев проведения экспериментов на стенде ПСБ РБМК**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;*

*исполнители: инженеры И.С. Лабыкин, К.В. Соколов, О.Е. Юсупов*

Цель работы: разработка сценариев проведения экспериментов на стенде ПСБ РБМК с учетом возможностей оборудования

Представлены следующие материалы:

- описания сценариев проведения экспериментов на стенде ПСБ РБМК с учетом возможностей оборудования;

- согласованный с главным конструктором РБМК - НИКИЭТ перечень экспериментов для стенда ПСБ РБМК;
- база исходных данных, необходимая для разработки расчетной модели стенда ПСБ РБМК;
- результаты численного анализа следующих характерных экспериментальных режимов:
- полный двухсторонний разрыв РГК до ОК
- полный двухсторонний разрыв РГК после ОК с отказом ОК соседнего РГК;
- разрыв опускного трубопровода возле всасывающего коллектора с одновременным обесточением собственных нужд станции, в том числе с незакрытием ОК РГК;
- частичный разрыв РГК.

Для расчетов использовались теплогидравлические коды ATHLET-MODL2-Cycle (GRS, Германия) и RELAP5/MOD3.2 (INEL, США). Проведение экспериментов на стенде ПСБ РБМК позволит снять неопределенности, возникшие в ходе численного анализа аварийных режимов.

*Разработка сценариев проведения экспериментов на стенде ПСБ РБМК: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИ АЭС; рук. Н.А. Брус; исполн.: И.С. Лабыкин, К.В. Соколов, О.Е. Юсупов. — Электрогорск, 2002. — 197 с. — Инв. № 3.638.*

### **Эксперименты на маломасштабных стендах**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук А.В. Андреев,*

*канд. техн. наук И.А. Пешков, В.Н. Жилко, инженер Д.Е. Марцинюк*

Представлены результаты проведенной серии экспериментальных исследований на маломасштабных стендах ТКР-Ф, ТКР-Ф (графит), ТКР-М ЭНИЦ. Отмечается, что полученные экспериментальные данные выявляют режимы и параметры разрушения топливного канала, взаимосвязи между характером разрушения топливного канала и параметрами истекающей среды, уровень воздействия струи теплоносителя на окружающие конструкции и отклик конструкций на это воздействие, а также позволяют наметить наиболее опасные с точки зрения разрушения ТК аварийные сценарии. При этом дополнительные эксперименты на маломасштабных стендах будут продолжены для уточнения параметров наихудшего аварийного сценария для полномасштабного стенда ТКР, а также в технологических целях. В частности, будут проведены эксперименты с разрывом циркониевой трубы в составе графитовой колонны (ТКР-Ф), эксперименты на стенде ТКР-Ф (графит) с рабочим участком, содержащим четыре графитовых блока, эксперименты на стенде ТКР-М с числом колонн, большим двух.

*Эксперименты на маломасштабных стендах: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: А.В. Андреев, И.А. Пешков, В.Н. Жилко, Д.Е. Марцинюк. — Электрогорск, 2003. — 159 с. — Инв. № 6.699.*

## **Результаты реализации промышленного дозирования газообразного кислорода в конденсатные тракты турбин энергоблоков № 3 и № 4 Курской АЭС**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.А. Гашенко;*

*исполнители: канд. техн. наук Б.А. Кольчугин, инженер О.Н. Абакумова,*

*от КУАЭС – инженеры: В.В. Стасенко, О.В. Яцко, В.Н. Кожин,*

*А.Н. Холодов*

В работе представлены фактические результаты и анализ измерений, выполненных в соответствии с «Программой исследовательских работ в процессе промышленной эксплуатации 3-го и 4-го энергоблоков Курской АЭС в условиях дозирования газообразного кислорода в конденсатные тракты», утвержденной 25.08.2003, в том числе:

- концентрация железа в пробах после ПНД-5 4-го энергоблока составляла при НБВР ~ 6 мкг/л и уменьшилась на — 17 % после дозирования кислорода в КТ, что означает снижение поступления окислов железа в КМПЦ на ~ 40 кг/год;
- сопоставление результатов анализов проб после ПНД-5 на 4-м энергоблоке при НБВР и НКВР свидетельствует об уменьшении концентрации хрома в конденсате, что однако требует дополнительного подтверждения — набором соответствующих статистических данных;
- сопоставление штатных замеров активности нуклидов  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{60}\text{Co}$  в воде КМПЦ в периоды до и после дозирования кислорода на 4-м энергоблоке обнаруживает уменьшение активности по нуклидам  $^{51}\text{Cr}$  (с  $3,3 \cdot 10^{-6}$  до  $2,2 \cdot 10^{-6}$  Ки/л) и  $^{60}\text{Co}$  (с  $3,2 \cdot 10^{-8}$  до  $1,7 \cdot 10^{-8}$  Ки/л) в период дозирования кислорода в КТ;
- сопоставление результатов измерения мощности дозы  $\gamma$ -излучения у основного оборудования 3-го энергоблока в периоды ППР — 2001 и 2004 г. обнаруживает улучшение радиационной обстановки в помещениях 804/2, 404/2 (ШАДР) и 305/1;
- преобладающая доля наблюдаемого улучшения могла быть обусловлена продувками тупиковых зон РГК, проводимыми в процессе эксплуатации.
- на 4-ом энергоблоке практически по всем помещениям (за исключением опускных трубопроводов в помещении 804/2 и вблизи калачей помещения 305/1), также наблюдалось улучшение радиационной обстановки, хотя продувки тупиковых зон РГК в период эксплуатации не проводились.

Отмечается, что для обеспечения стабилизации и постепенного улучшения радиационной обстановки вблизи основного оборудования КМПЦ, необходимо продолжение ведения НКВР в конденсатных трактах энергоблоков КуАЭС (с обязательным проведением регламентных технологических операций по очистке контуров от накопившихся ранее шлама и отложений).

При ППР целесообразна консервация поверхностей конденсатно-питательного тракта.

*Результаты реализации промышленного дозирования газообразного кислорода в конденсатные тракты турбин энергоблоков № 3 и №4 Курской АЭС: отчет о НИР / ФГУП ЭНИЦ; рук. В.А. Гашенко; исполн.: Б.А. Кольчугин, О.Н. Абакумова, В.В. Стасенко и др. — Электрогорск, 2004. — 118 с. — Инв. № 4.713.*

### **Подготовка и проведение пуско-наладочных экспериментов по исследованию гидродинамического воздействия истекающего теплоносителя при разрывах трубопроводов на АЭС**

*Руководитель канд. техн. наук Г.В. Осокин*

В работе представлены результаты экспериментов по определению параметров струи истечения теплоносителя при имитации разрывов трубопроводов диаметром 19, 45, 56 и 70 мм. Опыты проводились при начальном давлении теплоносителя 12,5 МПа и температурах 220÷270 °С. Отмечается, что в ходе проведенных экспериментов, в каждом опыте были определены в процессе истечения следующие гидродинамические параметры струи теплоносителя:

- давление и температура воды перед соплом истечения и в сосуде высокого давления;
- расход воды в трубопроводе истечения.

Проведенные испытания позволили также отработать методику разрыва мембран имитирующих разрыв трубопроводов и определения момента времени разрыва. Результаты опытов показали, что экспериментальная установка обеспечивает проведение испытаний с истечением теплоносителя при разрыве трубопроводов в диапазоне параметров, заданных матрицей экспериментов.

*Подготовка и проведение пуско-наладочных экспериментов по исследованию гидродинамического воздействия истекающего теплоносителя при разрывах трубопроводов на АЭС: отчет о НИР / ФГУП ЭНИЦ; рук. Г.В. Осокин. — Электрогорск, 2004. — 39 с. — Инв. № 1.712.*

### **Расчётно-экспериментальные исследования деформационной способности, статической и динамической устойчивости графитовых колонн кладки РБМК. Подготовка расчётной, методической и экспериментальной базы для исследования деформационной способности графитовой кладки РБМК**

*Научный руководитель проекта канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева; исполнители канд. физ.-мат. наук А.В. Андреев, инженеры С.А. Тимкин, Д.Е. Марцинюк*

Приведено краткое описание объекта исследования — стенда ТКР-М и системы измерений, а также представляются цели, объём и последовательность планируемых экспериментальных исследований. Представлены Про-

грамма и Методика экспериментальных исследований на стенде ТКР-М, которые разработаны на основе анализа предложений РНЦ «Курчатовский институт», в которых описываются последовательность проведения экспериментальных исследований, включая необходимые данные по выполнению отдельных экспериментов и совместно с документацией на стенд ТКР-М являются основанием для подготовки рабочих программ экспериментов. Представлена разработанная конструкторская документация на модернизацию стенда ТКР-М, реализация которой позволит достичь целей, определённых в Программе и Методике, а также разработанная документация по первому этапу проекта модернизации стенда ТКР с приложением чертежей, позволяющих судить об объёме модернизации стенда в целом.

*Расчётно-экспериментальные исследования деформационной способности, статической и динамической устойчивости графитовых колонн кладки РБМК. Подготовка расчётной, методической и экспериментальной базы для исследования деформационной способности графитовой кладки РБМК: отчёт о НИР/ ФГУП «ЭНИЦ»; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: А.В. Андреев, С.А. Тимкин, Д.Е. Марцинюк. — Электрогорск, 2005. — 61 с. — Инв. № 263-05/2.*

### **Расчётно-экспериментальные исследования деформационной способности, статической и динамической устойчивости графитовых колонн кладки РБМК. Подготовка расчётной, методической и экспериментальной базы для исследования деформационной способности графитовой кладки РБМК**

*Научный руководитель проекта канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева; исполнители: канд. физ.-мат. наук А.В. Андреев, инженеры С.В. Тимкин, Д.Е. Марцинюк*

На основе анализа и предложений РНЦ «Курчатовский институт» разработаны Программа и Методика экспериментальных исследований на стенде ТКР-М, описывающие последовательность проведения экспериментальных исследований и включающие необходимые данные по выполнению отдельных экспериментов, а также результаты выполненных экспериментов.

*Расчётно-экспериментальные исследования деформационной способности, статической и динамической устойчивости графитовых колонн кладки РБМК. Подготовка расчётной, методической и экспериментальной базы для исследования деформационной способности графитовой кладки РБМК: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: А.В. Андреев, С.В. Тимкин, Д.Е. Марцинюк. — Электрогорск, 2005. — Инв. № 263/05.*

## **Расчетно-экспериментальное исследование парообразующей способности графитовой кладки РБМК в условиях аварии. Подготовка расчетной, методической и экспериментальной базы для исследования парообразующей способности графитовой кладки РБМК**

*Научный руководитель канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук А.В. Андреев, канд. техн. наук В.Н. Жилко*

Разработаны Программа и Методика, которые описывают последовательность проведения экспериментальных исследований, включают необходимые данные по выполнению отдельных экспериментов совместно с документацией на стенд ТКР-Ф (графит) и являются основанием для подготовки рабочих программ экспериментов. Разработаны предложения по модернизации стенда ТКР-Ф (графит), реализация которых позволит моделировать нестационарный теплообмен в масштабе времени, характерном для потока теплоносителя, протекающего в кладке РБМК после разрыва ТК. В методическом обосновании экспериментального исследования выполнен аналитический и численный анализ теплового взаимодействия разогретых графитовых блоков с относительно более холодной пароводяной смесью. Рассмотрены возможные подходы к расчетной оценке коэффициента теплоотдачи от поверхности графитовых блоков к пароводяной смеси, истекающей в щель между блоками стенда ТРКФ-(графит). Разработана соответствующая методика, выполнена оценка погрешности определения температуры и теплового потока на поверхности графита.

*Расчетно-экспериментальное исследование парообразующей способности графитовой кладки РБМК в условиях аварии. Подготовка расчетной, методической и экспериментальной базы для исследования парообразующей способности графитовой кладки РБМК: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: А.В. Андреев, В.Н. Жилко. — Электрогорск, 2005. — Инв. № 264.05.*

## **Эксперименты на стенде ТКР-М**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук А.В. Андреев, инженер Д.Е. Марцинюк*

Приведены результаты экспериментальных исследований на маломасштабном стенде ТКР-М. Качественный и количественный анализ проведенных на стенде ТКР-М экспериментов позволил получить сведения об основных эффектах, сопровождающих деформирование колонн с ТК. Результаты экспериментов с одной, двумя и тремя колоннами с моделями ТК дали возможность проверить полученную расчетным путем зависимость жесткости группы колонн от их числа.

*Эксперименты на стенде ТКР-М: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: А.В. Андреев, Д.Е. Марцинюк. — Электрогорск, 2005. — 108 с. — Инв. № 6.733.*

## **Методические эксперименты на стенде ТКР**

*Руководитель канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук А.В. Андреев,*

*канд. техн. наук В.Н. Жилко, В.В. Ткачёв, И.А. Пешков,*

*инженеры С.В. Тимкин, Д.А. Марцинюк, О.А. Поштовая, К.Н. Желтухин*

Приведены результаты двух серий методических экспериментов по изгибу одиночной трубы ТК и колонны с трубой ТК на полномасштабном стенде ТКР. Отмечается, что получены новые данные по статической жесткости элементов конструкции РБМК, характеристикам свободных колебаний трубы ТК и колонны с трубой ТК, выявлены особенности деформирования труб ТК при прогибах колонн, отработана методика измерений деформаций и перемещений. Эксперименты по моделированию термомеханического разрушения одиночного ТК подтвердили возможность с помощью разработанного термитного нагревателя реализовать на стенде ТКР термомеханические условия, приводящие к разрыву канальной трубы в графитовой колонне.

*Методические эксперименты на стенде ТКР: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: А.В. Андреев, В.Н. Жилко, В.В. Ткачёв и др. — Электрогорск, 2005. — 108 с. — Инв. № 6.732.*

## **Расчётно-экспериментальное исследование деформационной способности статической и динамической устойчивости графитовых колонн кладки РБМК для обоснования продления срока службы энергоблока**

*Научный руководитель проекта канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук А.В. Андреев, инженер Д.Е. Марцинюк*

В работе содержится расчётно-теоретический анализ результатов экспериментов, выполненных на стенде ТКР-М в соответствии с Техническим Задаанием на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ «Расчётно-экспериментальное исследование деформационной способности статической и динамической устойчивости графитовых колонн кладки РБМК для обоснования продления срока службы энергоблока», в том числе:

- экспериментов, направленных на статистическое выявление уровня повторяемости результатов и получение оценки неопределённости экспериментальных данных;
- экспериментов по исследованию влияния продольной нагрузки, приложенной к модели ТК, на жёсткость и параметры свободных колебаний имитатора колонны;
- экспериментов по моделированию прогиба колонны с имитаторами графитовых блоков при различных величинах зазора между ними и моделью ТК под воздействием статических нагрузок и динамических возмущений;

- экспериментов по перемещениям элементов имитатора колонны под воздействием статических нагрузок и динамических возмущений при различных величинах прогиба точки приложения поперечной нагрузки;
- экспериментов по перемещениям элементов имитаторов колонн, состоящих из моделей графитовых блоков с различными типоразмерами, после их соударения.

Отмечается, что на базе экспериментальных данных, полученных на стенде ТКР-М, был апробирован код DENS-1, предназначенный для статистической обработки экспериментальных данных в виде выборок малых объёмов. Применение такого статистического аппарата может быть полезно в дальнейшем при анализе результатов экспериментов на полномасштабном стенде ТКР.

Представлены полученные статистические оценки влияния погрешности измерений на результаты экспериментов и влияния перемонтажа (разборки и повторной сборки колонн) на деформирование колонн. Отмечается, что опыт, накопленный при проведении экспериментов на малом стенде ТКР-М и при выполнении статистической обработки результатов этих экспериментов, должен быть учтён и использован соответствующим образом при выполнении экспериментов по деформированию колонн РБМК на полномасштабном стенде ТКР.

*Расчётно-экспериментальное исследование деформационной способности статической и динамической устойчивости графитовых колонн кладки РБМК для обоснования продления срока службы энергоблока: отчёт о НИР/ФГУП «ЭНИЦ»; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: А.В. Андреев, Д.Е. Марцинюк. — Электрогорск, 2006. — 138 с. — Инв. № 6.735.*

### **Расчётно-экспериментальное исследование парообразующей способности графитовой кладки РБМК в условиях аварии для обоснования продления срока службы энергоблока**

*Научный руководитель темы канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева; исполнители: канд. физ.-мат. наук А.В. Андреев, канд. техн. наук В.Н. Жилко*

В работе представлены:

- результаты модернизации стенда ТКР-Ф (графит) для проведения экспериментальных исследований по нестационарному теплообмену и проведенных пусконаладочных испытаний;
- разработанная методика определения коэффициента теплоотдачи и теплового потока, на основе которой получена оценка погрешности определения температуры и теплового потока на поверхности графита;
- разработанная методика построения критериального уравнения для нестационарного теплообмена в узких щелях графитовой кладки, которая даёт возможность переносить экспериментальные результаты на

процессы теплообмена в кладке РБМК, реализующиеся при разрыве топливного канала.

*Расчётно-экспериментальное исследование парообразующей способности графитовой кладки РБМК в условиях аварии для обоснования продления срока службы энергоблока: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: А.В. Андреев, В.Н. Жилко. — Электрогорск, 2006. — 107 с. — Инв. № 6.734.*

### **Программы экспериментов на стенде ПСБ-РБМК. Доводка элементов и систем стенда в соответствии с технологиями предстоящих исследований**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус (ЭНИЦ); исполнители: инженеры И.С. Лабыкин, С.С. Сергеева (ЭНИЦ), Ю.В. Миронов, А.Ф. Финякин, Д.А. Афремов, инженер В.Е. Гмырко (НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала)*

Проанализированы сценарии экспериментов на стенде ПСБ-РБМК и выработаны требования к объему измерений, диапазонам измеряемых и регистрируемых параметров, количеству задействованного оборудования и режимам его эксплуатации. Произведены настройка, тарировка и калибровка датчиков давления, измерительных участков для определения массовых расходов, термопар. Разработаны алгоритмы, определены наборы входных данных и реализованы компьютерные программы для расчета физических параметров по токовым сигналам датчиков. Проведена наладка электроприводов запорной и регулирующей арматуры. Проанализирована работа регуляторов теплогидравлических параметров, разработаны и реализованы в виде компьютерных программ алгоритмы их управления. Проведены доработки экспериментальных каналов стенда, позволяющих во всех запланированных режимах работы надежно охлаждать нижние токоподводы имитаторов ТВС. Выполнены работы, позволяющие осуществлять автоматическое управление циркуляционными насосами и охранными нагревателями.

*Программы экспериментов на стенде ПСБ-РБМК. Доводка элементов и систем стенда в соответствии с технологиями предстоящих исследований: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: И.С. Лабыкин, С.С. Сергеева, Ю.В. Миронов, А.Ф. Финякин, Д.А. Афремов, В.Е. Гмырко. — Электрогорск, 2006. — 281 с. — Инв. № 285.06.*

### **Определение основных характеристик элементов стенда ПСБ-РБМК. Исследование теплогидравлических характеристик КМПЦ РБМК в стационарных условиях**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус; исполнители: инженеры К.В. Соколов, С.С. Сергеева*

Приведены результаты выполненных на стенде ПСБ-РБМК характеристических экспериментов по определению основных характеристик

элементов стенда. Представлены значения гидравлических характеристик следующих элементов циркуляционного контура стенда:

- зоны тепловыделения экспериментального канала;
- участка верхнего токоподвода;
- модели верхней части топливного канала;
- пароводяных коммуникаций.

Отмечается, что характеристические эксперименты позволили определить основные гидравлические характеристики циркуляционного контура стенда и его компонентов, а также настроить элементы оборудования и определить их рабочие характеристики. Полученные результаты используются в качестве исходных данных для моделей расчётного кода при выполнении анализа экспериментов на стенде ПСБ РБМК.

*Определение основных характеристик элементов стенда ПСБ-РБМК. Исследование теплогидравлических характеристик КМПЦ РБМК в стационарных условиях: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: К.В. Соколов, С.С. Сергеева. — Электрогорск, 2006. — 131 с. — Инв. № 296.06.*

### **RELAP5. Претестовый расчетный анализ запланированных на стенде ПСБ-РБМК экспериментов. Экспериментальные исследования аварийного режима «снижение расхода в одном РГК из-за повреждения механического фильтра на входе в РГК»**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус; исполнители: инженеры К.В. Соколов, С.С. Сергеева*

Представлены результаты выполненных на стенде ПСБ РБМК экспериментальных исследований переходного режима с нарушением охлаждения реактора «Снижение расхода в одном РГК из-за повреждения механического фильтра на входе в РГК». Выполнены верификационные расчеты с использованием полученных экспериментальных данных. Проведены претестовые верификационные расчеты для последующих экспериментов и представлены:

- результаты экспериментальных исследований переходного режима РБМК «Снижение расхода в одном РГК из-за повреждения механического фильтра на входе в РГК»;
- результаты верификационных расчетов (претестовые и посттестовые расчеты) по вышеуказанному режиму;
- претестовые расчеты по предстоящим экспериментам.

В качестве второго режима для экспериментальных исследований на стенде ПСБ РБМК был выбран переходной режим с нарушением охлаждения реактора «Охлаждение активной зоны реактора в режиме естественной циркуляции при обесточивании собственных нужд станции, в том числе при срабатывании и последующем незакрытии ГПК». Данный режим выбран для экспериментальных исследований как режим, к которому наиболее подготовлен вновь введенный в эксплуатацию стенд ПСБ РБМК.

*RELAP5. Предтестовый расчетный анализ запланированных на стенде ПСБ-РБМК экспериментов. Экспериментальные исследования аварийного режима. Снижение расхода в одном РГК из-за повреждения механического фильтра на входе в РГК: отчет о НИР; рук. Н.А. Брус; исполн.: К.В. Соколов, С.С. Сергеева. — Электрогорск, 2007. — 152 с. — Инв. № 301.07.*

## **Исследование аварийных режимов РБМК-1000 на стенде ПСБ РБМК**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;  
исполнитель инженер К.В. Соколов*

Представлены результаты экспериментов по моделированию следующих аварийных и переходных режимов:

- снижение расхода в одном РГК из-за повреждения механического фильтра на входе в РГК;
- разрыв паропровода за пределами помещений СЛА;
- охлаждение активной зоны реактора в режиме естественной циркуляции при обесточении собственных нужд станции;
- разрыв опускного трубопровода;
- разрыв напорного коллектора.

Результаты (база экспериментальных данных) представлены в виде таблиц и графиков. Полученные экспериментальные данные используются для верификации кода RELAP5 применительно к РБМК-1000.

*Исследование аварийных режимов РБМК-1000 на стенде ПСБ РБМК: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн. К.В. Соколов. — Электрогорск, 2008. — 349 с. — Инв. № 332.08.*

## **Верификация кода RELAP5/MOD3.2 применительно к проблемам безопасности реактора РБМК**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;  
исполнители: инженеры К.В. Соколов, С.С. Сергеева*

Представлены результаты верификации кода RELAP5/MOD3.2 применительно к реактору РБМК с использованием экспериментальных данных, полученных на крупномасштабном интегральном стенде ПСБ РБМК. Предложенные для верификационного анализа экспериментальные данные были получены в ходе проведения интегральных экспериментов по моделированию аварийных и переходных режимов РБМК-1000. Сценарии этих экспериментов специально разрабатывались для получения данных, необходимых для верификации теплогидравлических кодов применительно к реактору РБМК. Верификационные расчёты заключались в прямом моделировании экспериментов.

*Верификация кода RELAP5/MOD3.2 применительно к реактору РБМК: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: К.В. Соколов, С.С. Сергеева. — Электрогорск, 2008. — 420 с. — Инв. № 333.08.*

## **Экспериментальное исследование на крупномасштабном стенде ПСБ РБМК аварийных режимов РБМК-1000: разрыв паропровода за пределами помещений СЛА; охлаждение активной зоны реактора в режиме естественной циркуляции при обесточивании собственных нужд станции; разрыв опускного трубопровода**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;  
исполнитель инженер К.В. Соколов*

Объектом исследования является крупномасштабный теплогидравлический стенд для моделирования аварийных и переходных режимов РБМК (стенд ПСБ РБМК). Представлены результаты выполненных на стенде ПСБ РБМК экспериментов по моделированию следующих аварийных и переходных режимов:

- разрыв паропровода за пределами помещений СЛА;
- охлаждение активной зоны реактора в режиме естественной циркуляции при обесточивании собственных нужд станции;
- разрыв опускного трубопровода.

Результаты (база экспериментальных данных) представлены в виде таблиц и графиков.

Полученные экспериментальные данные используются для верификации кода RELAP5 применительно к РБМК-1000.

*Экспериментальное исследование на крупномасштабном стенде ПСБ РБМК аварийных режимов РБМК-1000: разрыв паропровода за пределами помещений СЛА; охлаждение активной зоны реактора в режиме естественной циркуляции при обесточивании собственных нужд станции; разрыв опускного трубопровода: отчет о НИР; рук. Н.А. Брус; исполн. К.В. Соколов — Электрогорск, 2008. — 282 с. — Инв. № 316/08.*

## **Стендовые исследования ШАДР-32М и ШАДР-32М2-1 при теплофизических параметрах теплоносителя, близких к пусковым для РБМК**

*Исполнители: инженеры В.П. Матвеев, Н.В. Жегло, А.В. Столпник,  
Г.А. Климова, В.И. Повелко*

Рассмотрено влияние малого запаса давления теплоносителя до линии насыщения «пар-вода» на работу преобразователей расхода ШАДР-32(32М2-1) в стендовых условиях. Стендовые исследования ШАДР на установке УПР-50 при упомянутых условиях не выявили существенного влияния теплофизических параметров теплоносителя на стабильность работы ШАДР при малом запасе давления до линии насыщения «пар-вода» в режимах, близких к пусковым для РБМК-1000. В режимах работы с недогревом теплоносителя менее 15 °С до температуры насыщения обнаружено подкипание теплоносителя в сборке: запорно-регулирующий клапан-корпус ШАДР. Наличие паровой фазы в потоке не сказалось существенно на стабильности работы ШАДР и его диагностических критериях. Исследовано влияние износа шарика на стабильность работы ШАДР. Для ШАДР32М

влияние износа оказалось преобладающим, для ШАДР-32М2-1 – несущественным. Спектрально-корреляционный анализ выходного сигнала ШАДР выявил наличие признаков, характеризующих протекающий через него поток теплоносителя и движение чувствительного элемента (шарика) в полости ШАДР. Взаимным анализом пульсаций давления теплоносителя и сигналов ШАДР найдены первопричины особенностей функционирования расходомера ШАДР. Даны рекомендации по эксплуатации ШАДР-32М на АЭС с РБМК.

*Стендовые исследования ШАДР-32М и ШАДР-32М2-1 при теплофизических параметрах теплоносителя, близких к пусковым для РБМК: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; исполн.: В.П. Матвеев, Н.В. Жегло, А.В. Столпник, Г.А. Климова, В.И. Повелко. — Электрогорск, 2009. — 126 с. — Инв. № 825.09.*

**Выполнение расчетно-экспериментальных исследований в обоснование теплотехнической надежности ТВС (запаса до кризиса теплообмена) при увеличенном диаметре ТК. Разработка конструкторской документации для всех типов экспериментальных участков и моделей ТВС. Разработка сценариев предстоящих экспериментов. Описание проведенных работ. Обоснование основных технических решений**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;  
исполнители: инженеры К.В. Соколов, С.С. Сергеева, В.И. Лазарева,  
А.В. Лавренчук*

Задача исследований состояла в оценке влияния величины внутреннего диаметра ТК РБМК на условия возникновения кризиса теплообмена. Для этого было предложено провести следующие эксперименты:

- эксперименты по определению условий возникновения кризиса теплообмена в модели ТК РБМК номинальных размеров;
- эксперименты по определению условий возникновения кризиса теплообмена в модели ТК с увеличенным внутренним диаметром (84 мм) и соосным расположением модели ТВС;
- эксперименты по определению условий возникновения кризиса теплообмена в модели ТК с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), со смещенным расположением сборки в канале (с эксцентриситетом порядка 2 мм). Для предстоящих экспериментов был выбран крупномасштабный теплогидравлический стенд безопасности реактора РБМК-1000 – ПСБ РБМК (ОАО «ЭНИЦ», г. Электрогорск Московской области). Представлена конструкция разработанного экспериментального участка, который позволяет выполнить запланированные исследования при наличии следующего сменного оборудования:
- двух комплектов вытеснителя с внутренними диаметрами 80 мм и 84 мм;

- двух моделей ТВС с соосным и смещенным (с эксцентриситетом порядка 2 мм) расположением модели ТВС в канале.

Проанализирован общий сценарий опытов по исследованию условий возникновения кризиса теплообмена, который можно принять за основу при разработке конкретных подробных сценариев отдельных экспериментов. Установлено, что штатных измерений вполне достаточно для проведения предстоящих исследований. Модернизации АСНИ и СКУ стенда ПСБ РБМК не требуется.

*Обеспечение безопасности при эксплуатации. Выполнение расчетно-экспериментальных исследований в обоснование теплотехнической надежности ТВС (запаса до кризиса теплообмена) при увеличенном диаметре. Разработка конструкторской документации для всех типов экспериментальных участков и моделей ТВС. Разработка сценариев предстоящих экспериментов. Описание проведенных работ. Обоснование основных технических решений: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: К.В. Соколов, С.С. Сергеева, В.И. Лазарева, А.В. Лавренчук. — Электрогорск, 2009. — 93 с. — Инв. № 347.09.*

## **Определение условий возникновения кризиса теплообмена для полномасштабной модели ТКР РБМК-1000.**

### **Канал диаметром 84 мм со смещенным расположением сборки в канале (с эксцентриситетом). Оценка влияния эксцентриситета на условия возникновения кризиса теплообмена**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус; исполнители: инженер К.В. Соколов, С.С. Сергеева*

Объектом исследования являются модели топливного канала РБМК-1000 поочередно устанавливаемые на крупномасштабный теплогидравлический стенд безопасности РБМК (ПСБ РБМК). Цель работы: выполнение экспериментов по исследованию условий возникновения кризиса теплообмена в ТК РБМК-1000 с различными отклонениями от номинальных геометрических размеров. Выявление влияния отклонений от номинальных геометрических размеров ТК на условия возникновения кризиса теплообмена. Описаны результаты выполненной серии экспериментов по исследованию условий кризиса теплообмена в полномасштабной модели ТКР РБМК-1000 с внутренним диаметром 84 мм при соосном и смещенном (с эксцентриситетом) расположении модели ТВС в канале.

*Определение условий возникновения кризиса теплообмена для полномасштабной модели ТКР РБМК-1000. Канал диаметром 84 мм со смещенным расположением сборки в канале (с эксцентриситетом). Оценка влияния эксцентриситета на условия возникновения кризиса теплообмена: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: К.В. Соколов, С.С. Сергеева. — Электрогорск, 2010. — 72 с. — Инв. № 375.10.*

**Определение условий возникновения кризиса теплообмена для полномасштабной модели ТК РБМК-1000 с максимальным внутренним диаметром, равным 84 мм, при неравномерном обогреве имитаторов ТВЭЛ**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;  
исполнители: инженеры К.В. Соколов, С.С. Сергеева*

Объектом исследования являются модели топливного канала РБМК-1000, поочередно устанавливаемые на крупномасштабный теплогидравлический стенд безопасности РБМК (ПСБ РБМК). Целью работы являлось выполнение экспериментов по исследованию условий возникновения кризиса теплообмена в ТК РБМК-1000 с различными отклонениями от номинальных геометрических размеров для выявления влияния отклонений от номинальных геометрических размеров ТК на условия возникновения кризиса теплообмена. Представлены результаты работы по экспериментальному исследованию кризиса теплообмена в следующих полномасштабных моделях ТК РБМК-1000:

- в модели ТК РБМК-1000 номинальных размеров с равномерным обогревом имитаторов ТВЭЛ;
- в модели ТК РБМК-1000 с внутренним диаметром равным 84 мм, при соосном расположении модели ТВС в канале и равномерным обогревом имитаторов ТВЭЛ;
- в модели ТК РБМК-1000 с внутренним диаметром равным 84 мм со смещенным расположением сборки в канале (с эксцентриситетом) и равномерным обогревом имитаторов ТВЭЛ;
- в модели ТК РБМК-1000 с внутренним диаметром равным 84 мм, при соосном расположении модели ТВС в канале и неравномерном обогреве имитаторов ТВЭЛ.

*Определение условий возникновения кризиса теплообмена для полномасштабной модели ТК РБМК-1000 с максимальным внутренним диаметром, равным 84 мм, при неравномерном обогреве имитаторов ТВЭЛ: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: К.В. Соколов, С.С. Сергеева. — Электрогорск, 2010. — 71 с. — Инв. № 376.10.*

**Обобщение опытных данных по аварийным режимам полученных в экспериментах на комплексе разномасштабных стендов безопасности ТКР, ТКРФ и ТКР-М**

*Руководитель работ д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов;  
исполнители: к.ф.-м.н. Н.Ю. Медведева, канд. техн. наук В.Н. Жилко,  
инженер Е.Б. Солдатенкова*

Приведено краткое описание созданного в ЭНИЦ комплекса разномасштабных экспериментальных стендов для изучения аварийных процессов, протекающих в графитовой кладке РБМК при разрыве ТК. Представлены, проанализированы и обобщены результаты экспериментальных исследо-

ваний, проводившихся на стендах ТКР-Ф, ТКР-Ф (графит), ТКР-М, ТКР в 2001, 2005 и 2009 годах:

- Большой объем экспериментальных исследований, выполненных на маломасштабных стендах ТКР-Ф, ТКР-Ф (графит), ТКР-М, позволил выявить основные эффекты (критические факторы) интегрального аварийного процесса, вызванного разрывом ТК при перегреве канальной трубы. Сочетание этих факторов может усиливать или ослаблять разрушающее воздействие их на графитовую кладку реактора. Как определенное сочетание критических факторов сформулирован наихудший для РБМК аварийный сценарий.
- Проведены два полномасштабных эксперимента с разрывом ТК вследствие аварийного перегрева канальной трубы. В обоих экспериментах все ТК, окружающие аварийный канал, сохранили свою целостность.

Первый эксперимент проведен в «мягких» условиях по наиболее определенному и информативному сценарию, позволяющему увеличить степень определенности в поведении графитовой кладки в ходе эксперимента. В этом эксперименте впервые получены данные по интегральным процессам и явлениям, сопровождающим разрыв ТК.

Второй эксперимент был проведен по наихудшему для РБМК аварийному сценарию. При этом в ряде пунктов задаваемые в эксперименте начальные условия создавали более жесткую (консервативную) ситуацию развития аварии, что позволило получить необходимые данные для заключения о том, возможна ли авария данного типа на реакторах РБМК. Логика работ по организации полномасштабных экспериментов на стенде ТКР (комплекс экспериментальных исследований на маломасштабных стендах, выявивших критические факторы аварийного процесса, построение схемы наихудшего для РБМК аварийного сценария, адаптация этого сценария к условиям стенда ТКР, проверка элементов сценария в подготовительных экспериментах на стенде ТКР и уточнение параметров наихудшего сценария эксперимента в первом полномасштабном эксперименте) дает основания утверждать, что сохранение целостности соседних с аварийным каналом в проведенных двух экспериментах означает сохранение целостности этих же каналов при аналогичной аварии на РБМК.

Третий полномасштабный эксперимент дополнил полученный ранее объем знаний данными об аварийных процессах, протекающих в активной зоне реактора при «хрупком» разрушении ТК при номинальных параметрах теплоносителя – разрыве канальной трубы вследствие дефекта, возникшего в процессе длительной эксплуатации. Разрушения ТК, окружающих аварийный, не произошло и в этом эксперименте.

Полученные в проведенных экспериментальных исследованиях результаты могут быть использованы для верификации компьютерных кодов, моделирующих термомеханические аварийные процессы в активной зоне реактора, а также для обоснования безопасности АЭС с РБМК при

одиночном разрыве ТК с учетом проблемы возможности множественного разрушения труб ТК.

*Обобщение опытных данных по аварийным режимам полученных в экспериментах на комплексе разномасштабных стендов безопасности ТКР, ТКРФ и ТКР-М: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. О.И. Мелихов; исполн.: Н.Ю. Медведева, В.Н. Жилко, Е.Б. Солдатенкова. — Электрогорск, 2010. — 233 с. — Инв. № 359.10.*

**Выполнение экспериментальных исследований кризиса теплообмена для полномасштабной модели ТК РБМК-1000 номинального внутреннего диаметра и для модели ТК с внутренним диаметром, равным 84 мм. Обоснование достоверности и качества полученных результатов. Оценка влияния увеличения внутреннего диаметра ТК на условия возникновения кризиса теплообмена**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;  
исполнители: инженеры К.В. Соколов, С.С. Сергеева*

В период ППР на энергоблоке №1 ЛАЭС был выявлен ряд ТК, внутренние диаметры которых превысили допустимые по Регламенту максимальные значения. Исходя из сложившейся ситуации, было решено выполнить программу расчетно-экспериментальных работ по обоснованию эксплуатации ТК с увеличенным внутренним диаметром (до 84 мм). Для этого было предложено провести эксперименты по определению условий возникновения кризиса теплообмена в модели ТК РБМК номинальных размеров, а так же в модели ТК с увеличенным внутренним диаметром. Для проведения исследований по оценке влияния величины внутреннего диаметра ТК РБМК на условия возникновения кризиса теплообмена на стенде ПСБ РБМК установлен и введен в эксплуатацию новый рабочий участок. Данный рабочий участок является полномасштабной моделью ТК РБМК-1000. Тепловыделение в ТВС на данном рабочем участке моделируется пропусканием электрического тока через имитаторы твэл прямого нагрева (стальные трубки). Разработанная и смонтированная в ЭНИЦ новая схема электропитания стенда ПСБ РБМК позволила подвести к модели ТВС 4,0 МВт электрической мощности. С использованием вновь введенного в эксплуатацию рабочего участка была проведена серия экспериментов по исследованию условий возникновения кризиса теплоотдачи в ТК РБМК-1000 номинальных размеров. Представлены полученные результаты, которые хорошо согласуются с ранее полученными данными (в 70-е годы) на стенде КС (РНЦ КИ).

*Выполнение экспериментальных исследований кризиса теплообмена для полномасштабной модели ТК РБМК-1000 номинального внутреннего диаметра и для модели ТК с внутренним диаметром, равным 84 мм. Обоснование достоверности и качества полученных результатов. Оценка влияния увеличения внутреннего диаметра ТК на условия возникновения кризиса теплообмена: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: К.В. Соколов, С.С. Сергеева. — Электрогорск, 2010. — 67 с. — Инв. № 360.10.*

## Работы исследовательско-поискового характера

### Анализ эксперимента FARO L-33 кодом VAPEX

*Руководитель работы д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов, Ю.В. Парфёнов*

С помощью кода VAPEX проведен анализ эксперимента L-33 на установке FARO (Италия). Эксперимент посвящён изучению процессов перемешивания и процессов остывания большой массы (100 кг) кориума. Характерными особенностями этого эксперимента являются большой недогрев воды (124 К), низкое давление (4 атм), присутствие неконденсирующегося газа (аргон) и инициирование парового взрыва в момент касания расплавом дна сосуда. Расчёт кодом VAPEX эксперимента FARO L-33 продемонстрировал хорошее совпадение между экспериментальными данными и результатами расчетов. В этой работе была выполнена верификация кода VAPEX на данных уникального крупномасштабного эксперимента FARO L-33, в котором были реализованы все основные стадии парового взрыва, который может иметь место в ходе тяжёлой аварии на АЭС с реактором с водой под давлением.

*Анализ эксперимента FARO L-33 кодом VAPEX: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. О.И. Мелихов; исполн. В.И. Мелихов, Ю.В. Парфёнов. — Электрогорск, 2001. — 69 с. — Инв. №13.575.*

### Разработка технологии жидкофазного окисления нефтепродуктов, органических соединений и ПАВ в кубовом остатке отработанных стирочных растворов

*Руководитель работы канд. техн. наук А.Л. Гарзанов;*

*исполнители: д-р техн. наук И.А. Малахов, канд. хим. наук М.Д. Кушнирук, инженеры А.В. Усов, С.В. Смирнов*

Проведены стендовые испытания процесса высокотемпературного жидкофазного окисления (ЖФО) модельных растворов – имитаторов ЖРО. Исследованы зависимости процесса разложения трилона Б от температуры (100–300 °С), наличия в растворе воздуха или кислорода (предварительное насыщение раствора и непрерывный барботаж), времени термостатирования (1–90 мин), добавки ПАВ. Доказана эффективность метода ЖФО в получении высоких степеней разложения трилона Б и показано преимущество этого метода перед другими окислительными методами обработки жидких радиоактивных отходов.

*Разработка технологии жидкофазного окисления нефтепродуктов, органических соединений и ПАВ в кубовом остатке отработанных стирочных растворов: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. А.Л. Гарзанов; исполн. И.А. Малахов, М.Д. Кушнирук, А.В. Усов, С.В. Смирнов. — Электрогорск, 2001. — 24 с. — Инв. №9.577.*

## **Описание программного комплекса VAPEX**

*Руководитель канд. техн. наук В.И. Мелихов;  
исполнители: канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфёнов,  
д-р физ.-мат. наук С.Е. Якуш, инженер А.В. Соколин*

Разработан программный комплекс VAPEX, предназначенный для анализа взаимодействия расплава с теплоносителем в условиях тяжёлой аварии. Разработаны математические модели двух независимых программ VAPEX-P и VAPEX-D, служащих для моделирования предварительного перемешивания и взрыва, соответственно. Математические модели программного комплекса VAPEX основаны на использовании методов механики многофазных сред и позволяют рассчитать параметры воды, пара, неконденсирующегося газа, расплава, продуктов парового взрыва в случае тяжёлой аварии на АЭС.

*Описание программного комплекса VAPEX: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. В.И. Мелихов; исполн. Ю.В. Парфёнов, С.Е. Якуш, А.В. Соколин. — Электрогорск, 2004. — 54 с. — Инв. №13.696.*

## **Анализ взаимодействия расплава материалов активной зоны с теплоносителем с помощью программного комплекса VAPEX**

*Руководитель д-р техн. наук В.И. Мелихов;  
исполнители: д-р физ.-мат. наук С.Е. Якуш, инженер М.В. Давыдов*

Выполнен обзор экспериментальных и теоретических работ по окислению расплава материалов активной зоны (кориум) во время взаимодействия с водой. Предложена математическая модель окисления капли расплава в пароводяной среде для последующего внедрения в код VAPEX, предназначенный для анализа взаимодействия высокотемпературного расплава кориума с водой в ходе тяжёлой аварии на АЭС. Изложены результаты верификации программного комплекса VAPEX на данных крупномасштабных экспериментов FARO по взаимодействию расплавленного кориума с водой. Проведен расчётный анализ внутрикорпусного взаимодействия кориума с водой, выполненный в соответствии со сценарием, разработанным в рамках Международной программы OECD SERENA. Описан модуль VAPEX-M, предназначенный для включения в состав системы тяжелоаварийных кодов РАТЕГ/СВЕЧА/ГЕФЕСТ, а также программный интерфейс между модулем VAPEX-M и комплексом РАТЕГ/СВЕЧА/ГЕФЕСТ. Выполнен расчёт модельной аварии с помощью комплекса РАТЕГ/СВЕЧА/ГЕФЕСТ/VAPEX.

*Анализ взаимодействия расплава материалов активной зоны с теплоносителем с помощью программного комплекса VAPEX: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн. С.Е. Якуш, М.В. Давыдов. — Электрогорск, 2005. — 131 с. — Инв. №13.726.*

## **Подготовка к аттестации модуля VAREX-M, предназначенного для моделирования взаимодействия расплава материалов активной зоны с теплоносителем**

*Руководитель д-р техн. наук В.И. Мелихов;  
исполнители: д-р физ.-мат. наук С.Е. Якуш,  
канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфёнов*

Выполнена подготовка к аттестации модуля VAREX-M, предназначенного для анализа взаимодействия расплава материалов активной зоны с теплоносителем в условиях тяжёлой аварии. Дано описание математической модели модуля VAREX-M. Представлена система корреляций, используемая для межфазного взаимодействия расплава с теплоносителем. Изложены модель фрагментации струи и капель расплава и модель выделения водорода из-за окисления высокотемпературного расплава водяным паром. Разработана инструкция пользователя модуля VAREX-M с детализацией всех параметров, входных и выходных данных. Проведены тестовые расчёты, направленные на проверку правильности работы модуля VAREX-M в составе объединённого кода и оценку точности получаемых результатов. Получено хорошее совпадение расчётных и теоретических значений. На основе разработанной матрицы верификации проведены расчёты с помощью полного объединённого кода РАТЕГ/СВЕЧА/ГЕФЕСТ/VAREX, которые показали, что модуль VAREX-M адекватно описывает сложные процессы нестационарного взаимодействия высокотемпературного расплава с теплоносителем. Это позволяет использовать модуль VAREX-M в составе объединённого кода РАТЕГ/СВЕЧА/ГЕФЕСТ для расчёта взаимодействия расплава с теплоносителем в ходе тяжёлой аварии на АЭС.

*Подготовка к аттестации модуля VAREX-M, предназначенного для моделирования взаимодействия расплава материалов активной зоны с теплоносителем: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн. С.Е. Якуш, Ю.В. Парфёнов. — Электргорск, 2006. — 88 с. — Инв. №13.743.*

## **Стендовые испытания сильноосновных гелевых анионитов, вошедших в перечень ионитов, разрешённых для применения на АЭС**

*Руководитель канд. хим. наук Л.А. Галимова;  
исполнители: канд. хим. наук С.Г. Амбарцумян, инженер Н.М. Подволоцкая*

Проведены испытания по отработке методики совместного определения осмотической стабильности и механической прочности сильноосновных гелевых анионитов, используемых для загрузки фильтров конденсатоочистки АЭС, в соответствии с разработанной в ОАО «ВНИИ-АЭС» «Программой испытаний для доработки методики совместного определения осмотической стабильности и механической прочности ионообменных смол в динамических условиях» на специальном стенде. По итогам выполненных работ установлены параметры проведения стендовых испытаний, в том числе:

- необходимое количество циклов испытаний для сильноосновных анионитов гелевого типа»;
- необходимое время обработки проб ионитов в течение одного цикла;
- расходные характеристики рабочих сред при проведении испытаний;
- объём пробы ионита для загрузки рабочих колонок;
- метод расчёта результатов после проведения испытания.

Подготовлены заключения по испытаниям сильноосновных гелевых анионитов марки Monosphere A 550 LC производства фирмы «DowEurope» и марки Monoplus M 500 KR производства фирмы «LanXess».

*Стендовые испытания сильноосновных гелевых анионитов, вошедших в перечень ионитов, разрешённых для применения на АЭС: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. Л.А. Галимова; исполн. С.Г. Амбарцумян, Н.М. Подволоцкая. — Электрогорск, 2006. — 33 с. — Инв. № 357/10.*

### **Совершенствование водно-химических режимов и средств их ведения. Стендовые испытания сильнокислотных катионитов макропористого типа, используемых для загрузки фильтров конденсатоочистки АЭС.**

#### **Анализ полученных данных, разработка и выдача рекомендаций**

*Руководитель работы канд. хим. наук Л.А. Галимова;*

*исполнители: канд. хим. наук С.Г. Амбарцумян, инженер Н.М. Подволоцкая*

Приведены результаты стендовых испытаний образцов сильнокислотных компонентов макропористого типа марки Lewatit Monoplus SP 112H производства фирмы «Lanxess» и марки Ambersep 252H производства фирмы «RohmandNaas», используемых для загрузки фильтров конденсатоочистки АЭС, в соответствии с разработанной ОАО «ВНИИАЭС» «Программой испытаний для доработка методами совместного определения осмотической стабильности и механической прочности ионообменных смол в динамических условиях на стенде ИОН-1» с целью отработки методики совместного определения осмотической стабильности и механической прочности сильнокислотных макропористых катионитов.

Испытания проб сильнокислотных катионитов макропористой структуры проводились при следующих параметрах работы стенда ИОН-1:

- расход 10%-ного раствора  $H_2SO_4$  в рабочих колонках для регенерации катионита —  $(125 \pm 7)$  см<sup>3</sup>/мин;
- расход 10%-ного раствора щёлочи в рабочих колонках для истощения катионита —  $(125 \pm 7)$  см<sup>3</sup>/мин;
- расход отмывочной воды в рабочих колонках — 6 дм<sup>3</sup>/мин;
- давление отмывочной воды в рабочих колонках — 0,6 МПа.

Стендовые испытания проводились на двух образцах сильнокислотных макропористых катионитов, применяемых на АЭС. Для каждого выбранного образца выполнены три блока испытаний по 20; 40; 60 циклов обработки в автоматическом режиме с использованием АСУ стенда ИОН-1, обеспечивающей контроль, запись и архивирование в АСНИ основных рабочих

параметров испытаний и состояния технологического оборудования. Расход растворов кислоты и щелочи через рабочие колонки контролировался вручную через определенное количество циклов с установленной периодичностью. По итогам выполненных работ разработана методика совместного определения осмотической стабильности и механической прочности сильнокислотных катионитов макропористого типа, установлены параметры проведения стендовых испытаний:

- необходимое количество циклов испытаний макропористого типа;
- необходимое время обработки проб ионитов в течение одного цикла;
- расходные характеристики рабочей среды при проведении испытаний;
- объём пробы ионита для загрузки рабочих колонок;
- метод расчета результатов после проведения испытания.

*Совершенствование водно-химических режимов и средств их ведения. Стендовые испытания сильнокислотных катионов макропористого типа, используемых для загрузки фильтров конденсатоочистки АЭС. Анализ полученных данных, разработка и выдача рекомендаций: акт о выполнении работ / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. Л.А. Галимова; исполн. С.Г. Амбарцумян, Н.М. Подволоцкая. — Электрогорск, 2009. — 52 с. — Инв. №352.10.*

## Работы прикладного характера

### **Разработка расходомерного устройства измерения расхода пара, монтаж, наладка и испытание системы на ПГ энергоблока АЭС с ВВЭР-1000. Метрологическая аттестация системы**

*Руководитель д-р техн. наук А.Г. Агеев;*

*исполнители: канд. техн. наук Р.В. Васильева, инженеры Т.В. Карпова, Г.Б. Кожаринова, техник К.М. Малова*

Выполнена работа «Система измерения расхода пара в паропроводах парогенераторов ПГВ-1000 и результаты её испытаний в паропроводе ПГ-4 III блока Балаковской АЭС». Разработана система безынерционного измерения расхода пара в паропроводах парогенераторов энергоблоков ВВЭР-1000 для схемы регулирования уровня воды в ПГ. Обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования в качестве датчиков скорости пневмометрических трубок. Для измерения средней скорости потока определено расположение приёмных отверстий измерительной трубки в паропроводе на расстоянии  $0,25R$  от внутренней стенки паропровода. Для корректировки выходного сигнала датчика перепада давления разработан алгоритм корректировки и корректор тока, определена градуировочная характеристика корректора тока. На ПГ-4 III блока Балаковской АЭС проведены испытания системы измерения расхода пара, показана работоспособность системы измерения при номинальной мощности блока и при изменении мощности блока от номинальной до 50%.

*Разработка расходомерного устройства измерения расхода пара, монтаж, наладка и испытание системы на ПГ энергоблока АЭС с ВВЭР-1000. Метрологическая аттестация системы: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. А.Г. Агеев; исполн.: Р.В. Васильева, Т.В. Карпова, Г.Б. Кожаринова, К.М. Малова. — Электрогорск, 2002. — 32 с. — Инв. №12.621.*

## **Обзор методов обеззараживания и биологической стабилизации природных вод. Лабораторные испытания минеральных и органических биоцидов по воздействию на дрейссену**

*Руководитель работы канд. техн. наук А.Л. Гарзанов;  
отв. исполнитель канд. хим. наук М.Ю. Кушнирук;  
соисполнители: д-р техн. наук И.А. Малахов, д-р мед. наук М.В. Богданов,  
д-р биолог. наук Г.А. Виноградов, канд. биолог. наук В.Б. Вербицкий*

Объект исследований — природные воды прудов-охладителей АЭС, содержащие комплексы микроорганизмов и биоценозы — обрастатели твердых поверхностей. Цель работы — разработка технологии по предотвращению биозагрязнений и очистке трактов техводоснабжения от биологических обрастаний с помощью биоцидных препаратов и технических мероприятий. Представлен аналитический обзор современных методов обеззараживания и биологической стабилизации природных вод, методика проведения испытаний по биоцидной обработке воды и первые результаты экспериментов по воздействию на дрейссену неорганических препаратов и биоцида на основе ПГМГ (биосепта), которые показали, что наиболее перспективно:

- использование углекислого газа, получаемого путем снижения рН природной воды до значений 5,5 при содержании гидрокарбонатов в воде не менее 150–220 мг/л;
- применение биоцида Биопаг-Д (биосепт);
- возможное сочетание указанных реагентов (требует проверки).

В частности, при 2–3 ч водообмене и температуре воды 22 °С при закислении воды серной кислотой до рН = 5,1 в течение суток наблюдается 100%-ная гибель молоди дрейссены. В более щелочной среде процент гибели моллюсков снижается. При температуре воды 29,5 °С гибель дрейссены наступает при меньшей экспозиции и при этом погибают все возрастные группы моллюсков. Установлено, что молодь дрейссены более устойчива к повышению концентрации углекислого газа, чем взрослые особи. Углекислый газ, образующийся в результате титрования воды серной кислотой до рН = 5,5, при температуре воды 25–30 °С в состоянии убивать дрейссену в течение суток при концентрации СО<sub>2</sub> в воде не менее 150 мг/л.

*Обзор методов обеззараживания и биологической стабилизации природных вод. Лабораторные испытания минеральных и органических биоцидов по воздействию на дрейссену: отчет о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. А.Л. Гарзанов; исполн. М.Ю. Кушнирук, И.А. Малахов, М.В. Богданов и др. — Электрогорск, 2002. — 29 с. — Инв. №9.628.*

## **Опыт эксплуатации тепловыделяющей сборки ТВС 2 установки ПСБ-ВВЭР**

*Руководитель работы д-р техн. наук Э.А. Болтенко;*

*исполнители: канд. техн. наук И.В. Ёлкин, В.Д. Локтионов, В.С. Григорян;  
соисполнитель от ОАО «Машзавод» инженер Ю.Н. Бабенко*

Проведен анализ эксплуатации ТВС 2 (мощность 1,5 МВт) стенда ПСБ ВВЭР, сформированной из двух типов имитаторов твэлов конструкции ОАО «Машзавод». В общей сложности ТВС 2 проработала 1392 часа, выполнено 19 пусков. Проведена оценка температурных режимов работы имитаторов. Проведен анализ факторов, приведших к выходу ТВС 2 из строя.

*Опыт эксплуатации тепловыделяющей сборки ТВС 2 установки ПСБ-ВВЭР: отчёт о НИР / ЭНИЦ ВНИИАЭС; рук. Э.А. Болтенко; исполн. И.В. Ёлкин, В.Д. Локтионов, В.С. Григорян и др. — Электрогорск, 2003. — 47 с. — Инв. №6.656.*

## **Испытание модели парогенератора. Описание оборудования и систем стенда. Программа и методика испытаний**

*Руководитель темы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: канд. техн. наук Е.И. Трубкин, инженеры С.М. Никонов, В.Б. Трушина*

Отмечается, что во ФГУП «ЭНИЦ» создается стенд «Парогенератор» для проведения теплотехнических и термоциклических испытаний натурной модели секции парогенератора SMART-R, изготовленного фирмой DOOSAN (Южная Корея). Представленная для испытаний модель секции представляет собой двухконтурную систему, контур греющего теплоносителя (первый контур) и контур нагреваемого теплоносителя (второй контур). Программа испытаний включает исследование характеристик в стационарных условиях работы (теплотехнические испытания) термоциклические испытания. Представленные в отчете описание систем стенда (технологический, электрический, АСНИ и др.), а также Методики и Программы испытаний позволяют сделать вывод, что создаваемый стенд «Парогенератор» отвечает задачам и требованиям Заказчика.

*Испытание модели парогенератора. Описание оборудования и систем стенда. Программа и методика испытаний: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн. Е.И. Трубкин, С.М. Никонов, В.Б. Трушина. — Электрогорск, 2004. — 122 с. — Инв. № 2.703.*

## **Расчётно-аналитическое исследование системы измерения давления в первом контуре стенда ПСБ-ВВЭР при разрыве горячего трубопровода**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;*

*отв. исполнитель канд. техн. наук А.П. Прошутинский*

Целью работы является расчётно-аналитическое исследование системы измерения давления в первом контуре стенда ПСБ-ВВЭР при разрыве горячего трубопровода. Проведенным исследованием установлено:

- колебательный процесс изменения давления в первом контуре стенда ПСБ-ВВЭР, зафиксированный в эксперименте, связан с неудовлетворительной динамикой измерительной системы;
- изменение давления в эксперименте представляет собой монотонно убывающую функцию;
- удовлетворительный результат относительно минимизации динамической погрешности при измерении давления на стенде ПСБ-ВВЭР достигается при длине импульсной линии в пределах одного метра. Приводится полученная расчетным путем уточненная кривая изменения давления в первом контуре стенда ПСБ-ВВЭР, а также формула для оценки периода колебаний на выходе измерительного преобразователя давления от длины импульсной линии. Подчеркивается, что при исследованиях быстро текущих процессов на стендах необходимо уделять серьезное внимание выбору системы измерений: выбору параметров измерительных преобразователей и длин импульсных линий.

*Расчётно-аналитическое исследование системы измерения давления в первом контуре стенда ПСБ-ВВЭР при разрыве горячего трубопровода: отчет о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин, исполн. А.П. Прошутинский. — Электрогорск, 2004. — 28 с. — Инв. № 2.708.*

### **Исследование воздействия ударных волн и струй истекающего теплоносителя при разрывах трубопроводов (верификация программы УДАР 3D)**

*Руководитель д-р техн. наук В.И. Мелихов;  
отв. исполнитель канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфёнов*

Проведена кросс-верификация программы УДАР 3D и методик по ударной волне и струе, приведенных в РД 95-70532-96. В качестве первой задачи о воздействии ударных волн рассматривался поперечный разрыв трубопровода Ду 500 около стены. Во второй задаче о воздействии ударных волн моделировался разрыв трубопровода Ду 850 по боковой образующей гiba. В третьей и четвёртой задачах рассчитывалась нагрузка на стену от воздействия струи теплоносителя трубопровода Ду 850.

*Исследование воздействия ударных волн и струй истекающего теплоносителя при разрывах трубопроводов (верификация программы УДАР 3D): отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн. Ю.В. Парфёнов. — Электрогорск, 2005. — 60 с. — Инв. №13.724.*

### **Характеристические эксперименты для системы измерения расхода теплоносителя, истекающего из первого контура**

*Отв. исполнитель канд. техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнители: канд. техн. наук И.А. Липатов, Е.И. Трубкин;  
инженеры С.М. Никонов, А.А. Ровнов, А.В. Басов*

Цель работы — испытание системы измерения расхода теплоносителя при имитации большого двустороннего гильотинного разрыва главного цир-

куляционного трубопровода на стенде ПСБ-ВВЭР. Представлено краткое описание системы измерения расхода теплоносителя, истекающего из первого контура, описаны результаты, полученные при испытаниях системы, которые были выполнены в два этапа во избежание возможных повреждений стенда и для последовательной разработки конструкции элементов системы.

*Характеристические эксперименты для системы измерения расхода теплоносителя, истекающего из первого контура: отчет о НИР / ФГУП ЭНИЦ; исполн. И.В. Ёлкин, И.А. Липатов, Е.И. Трубкин и др. — Электрогорск, 2005. — 44 с. — Инв. №2.721.*

### **Верификация программы УДАР 3D. Экспериментально-расчетные исследования ударной волны и струи**

*Руководитель работы канд. техн. наук И.В. Елкин;*

*исполнители: д-р техн. наук В.И. Мелихов, канд. техн. наук Е.И. Трубкин, канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфенов*

В работе представлены результаты экспериментов по динамическому воздействию на преграды ударной волны и струи истекающего теплоносителя, выполненные на стенде БК В-213. Эксперименты проводились при начальном давлении теплоносителя 12,5 МПа и температуре 270–280 °С. Расстояние до экрана составляло 250 мм в первом эксперименте и 750 мм во втором эксперименте.

Система измерений стенда включала в себя тринадцать высокочастотных датчиков, установленных в различных точках экрана и на специальной преграде, выполненной в виде трехгранного угла, предназначенных для регистрации изменения давления. В первом эксперименте были зафиксированы максимальные давления в центре экрана ~ 7 МПа, основное динамическое воздействие было сосредоточено в центральной части экрана радиусом 250 мм. Во втором эксперименте максимальное давление составляло ~ 0,8 МПа. Полученные экспериментальные данные предназначены для проведения последующей верификации расчетной программы УДАР 3D.

*Верификация программы УДАР 3D. Экспериментально-расчетные исследования ударной волны и струи: отчет о НИР / ФГУП ЭНИЦ; рук. И.В. Елкин, исполн. В.И. Мелихов, Е.И. Трубкин, Ю.В. Парфенов. — Электрогорск, 2005. — 62 с. — Инв. №1.718.*

### **Анализ и разработка математических моделей и численных методов для теплогидравлического кода нового поколения**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфенов, С.Е. Якуш*

В работе отмечается:

а) Разработка теплогидравлических кодов нового поколения, предназначенных для улучшенного описания двухфазных потоков, является важной и актуальной задачей. Существуют реальные практические потребности в

более точном моделировании (трехмерном, многожидкостном и т.д.) теплогидравлических процессов, возникающих в ходе развития аварии на АЭС.

б) Западные страны в течение последних десяти лет разрабатывают новые подходы, математические модели, численные методы, необходимые для перехода на следующий качественный уровень описания двухфазных потоков. Особенно впечатляющей выглядит продуманная и скоординированная стратегия улучшения качества моделирования 3D двухфазных течений и создания теплогидравлических кодов нового поколения, разработанная во Франции.

в) В результате работы в основном западных экспертов к настоящему времени сформировался набор требований к теплогидравлическому коду нового поколения, среди которых можно выделить следующие:

- наличие уравнения для описания транспорта межфазной поверхности вместо статической карты режимов;
- моделирование процессов турбулентного переноса;
- использование высокоточных численных методов;
- применение неструктурированных расчетных сеток.

В настоящей работе основное внимание уделяется анализу современных численных методов применительно к задачам двухфазной теплогидравлики. Выполнено сравнение двух численных схем (полуявной схемы, используемой в кодах RELAP, TRAC и др., и перспективной схемы AUSM) на трех тестовых задачах.

д) Показано, что оба численных метода в целом дают приемлемые результаты, тем не менее метод на основе AUSM более точен. К тому же численный метод на основе схемы AUSM позволяет применять более высокий порядок пространственной аппроксимации, что делает его более предпочтительным. Помимо этого данный алгоритм является высокоэффективным, достаточно простым в реализации, пригодным для широкого класса проблем, легким для обобщения на многомерные задачи, все это делает его перспективным для использования в теплогидравлическом коде нового поколения.

*Анализ и разработка математических моделей и численных методов для теплогидравлического кода нового поколения: отчет о НИР / ФГУП ЭНИЦ; рук. В.И. Мелихов; исполн. Ю.В. Парфенов, С.Е. Якуш. — Электрогорск, 2005. — 61 с. — Инв. №13.723.*

### **Исследование неустойчивости двухфазного потока в вертикальных параллельных парогенерирующих каналах и передача Базы экспериментальных данных**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;  
исполнитель инженер К.В. Соколов*

В работе приведены результаты работ по договору с южнокорейским институтом KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute), проведенных в период с 2003 по 2005 годы.

Представлены результаты экспериментальных исследований границ теплогидравлической устойчивости для нескольких типов обогреваемых рабочих участков (рабочих участков, выполненных в виде стальных труб с внутренним диаметром 8 мм и рабочих участков, моделирующих элементы активной зоны южнокорейского реактора), т.е. определены области устойчивой и неустойчивой работы системы вертикальных параллельных парогенерирующих каналов разных конструкций. Каждому эксперименту предшествовали претестовые расчёты. Отмечается, что для расчёта границ устойчивости использовалась разработанная в ЭНИЦ компьютерная программа, в которой решается задача анализа устойчивости линеаризованной системы уравнений, описывающей динамику теплогидравлических процессов, протекающих в идентичных, параллельных, парогенерирующих каналах. Получено хорошее согласование результатов расчётов с экспериментом. Отмечается также, что в проведённых экспериментальных исследованиях продемонстрирована опасность попадания системы вертикальных параллельных парогенерирующих каналов в область неустойчивости, когда колебания теплогидравлических параметров приводят к резкому ухудшению теплообмена и росту температур стенок тепловыделяющих элементов.

*Исследование неустойчивости двухфазного потока в вертикальных параллельных парогенерирующих каналах и передача Базы экспериментальных данных: отчёт о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн. К.В. Соколов. — Электрогорск, 2005. — 153 с. — Инв. №3.715.*

### **Термоциклические испытания натурной модели секции парогенератора реактора SMART-P**

*Руководитель темы канд. техн. наук И.В. Ёлкин;*

*отв. исполнитель канд. техн. наук В.И. Гудков;*

*исполнители: канд. техн. наук Е.И. Трубкин, инженеры С.М. Никонов, В.И. Белов, Т.В. Карпова, В.И. Акинин*

Проведено исследование работы модели парогенератора в условиях термоциклических нагрузок. Проведены термоциклические и гидравлические испытания модели парогенератора в соответствии с программой и методикой, разработанными ФГУП ОКБМ. Испытания проведены в три этапа, каждый из которых включал в себя гидроиспытания, нагрев, термоциклирование, контрольный теплогидравлический режим и расхолаживание стенда. Полученный экспериментальный материал служит основой для анализа механической прочности элементов модели парогенератора.

*Термоциклические испытания натурной модели секции парогенератора реактора SMART-P: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин, исполн. В.И. Гудков, Е.И. Трубкин, С.М. Никонов и др. — Электрогорск, 2005. — 49 с. — Инв. №2.722.*

### **Разработка сборника рекомендаций по расчёту теплофизических свойств конструкционных материалов для водоохлаждаемых реакторов (выбор, подготовка и проверка расчётных рекомендаций)**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук В.И. Мелихов;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфёнов, инженер Т.Н. Ретивова*

Работа содержит результаты поиска информации по теплофизическим свойствам материалов активных зон реакторов типа ВВЭР, её анализа и подготовки системы рекомендаций по расчёту теплофизических свойств конструкционных материалов для водоохлаждаемых реакторов. Рассматриваются группы материалов: топливо, конструкционные материалы на основе циркония и стали, поглотители, газы. Информация по свойствам включает следующие характеристики: параметры фазовых переходов, энтальпия, удельная теплоёмкость, плотность, температурный коэффициент линейного расширения, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, электросопротивление, число Лоренца.

*Разработка сборника рекомендации по расчёту теплофизических свойств конструкционных материалов для водоохлаждаемых реакторов (выбор, подготовка и проверка расчётных рекомендаций): Отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн. Ю.В. Парфёнов, Т.Н. Ретивова. — Электрогорск, 2006. — 101 с. — Инв. №13.740.*

### **Предложения и рекомендации по использованию сильнокислотных катионов гелевого типа в системах очистки технологических сред АЭС**

*Руководитель работы канд. хим. наук Л.А. Галимова;*

*исполнители: канд. хим. наук С.Г. Амбарцумян, инженер Н.М. Подволоцкая*

Проведен анализ требований руководящих документов и отраслевых стандартов к ионообменным смолам, применяемым на АЭС, а также разработаны рекомендации и предложения по оценке качества ионитов, поставляемых на АЭС и их использованию в фильтрах различных установок.

*Предложения и рекомендации по использованию сильнокислотных катионов гелевого типа в системах очистки технологических сред АЭС: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. Галимова; исполн. С.Г. Амбарцумян, Н.М. Подволоцкая. — Электрогорск, 2007. — 22 с. — Инв. №5.807.*

### **Проект АЭС-2006. Формирование базы опытных данных для валидации расчётных кодов улучшенной оценки применительно к АЭС с ВВЭР**

*Руководитель работы д-р техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: канд. техн. наук И.А. Липатов, инженеры А.А. Ровнов, С.М. Никонов, А.В. Басов*

Разработана база данных по экспериментам на установке ПСБ-ВВЭР для задач валидации расчётных кодов улучшенной оценки для обоснования новых проектов ВВЭР, в первую очередь «АЭС-2006». Проанализированы опытные данные, полученные после проведения экспериментов

на установке ПСБ-ВВЭР. При этом осуществлена выбраковка показаний некорректно работавших датчиков, проведены переформатирование файлов опытных данных, их каталогизация и размещение в базе данных. База данных представляет собой отчёт с описанием экспериментов на ПСБ-ВВЭР и электронные файлы с опытными данными. Вторая часть отчёта содержит сводный результат корректировки и дополнительного поиска информации по теплофизическим свойствам основных материалов активных зон реакторов типа ВВЭР, анализа и подготовки системы рекомендаций по расчёту. Система рекомендаций предназначена для исследователей, проектировщиков и конструкторов для использования в теплогидравлических расчётах процессов в реакторных установках.

*Проект АЭС-2006. Формирование базы опытных данных для валидации расчётных кодов улучшенной оценки применительно к АЭС с ВВЭР: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн. И.А. Липатов, А.А. Ровнов, С.М. Никонов, А.В. Басов. — Электрогорск, 2007. — 247 с. — Инв. №2.814.*

### **Теплогидравлические испытания натурной модели секции парогенератора реактора SMART-P**

*Руководитель темы д-р техн. наук И.В. Ёлкин;  
руководитель работы канд. техн. наук Е.И. Трубкин;  
исполнители: канд. техн. наук С.М. Никонов, В.И. Акинин,  
канд. хим. наук Л.А. Галимова*

Выполнены:

- гидравлические испытания на плотность и прочность модели парогенератора;
- отмывка и пассивация контуров греющего и нагреваемого теплоносителей;
- теплогидравлические испытания модели парогенератора реактора SMART-P, предоставленного фирмой DOOSAN (Южная Корея).

Гидравлические испытания на прочность модели ПГ (сосуда и трубной системы-кассеты) выполнены пробным давлением 23,9 МПа в течение 20 мин, а на плотность пробным давлением 1,5 МПа, в течение 1 часа. Отмывка и пассивация поверхностей контура стенда выполнены по «Методике промывки контуров греющего и нагреваемого теплоносителей» (ПГ.090.00.00.00.МО), согласованной с ОКБМ. Отмывка поверхности контура греющего теплоносителя проводилась обессоленной водой и 0,5% раствором щавелевой кислоты. Пассивация поверхности контура греющего теплоносителя выполнена 5% раствором диаммония гидрофосфата с концентрацией фосфат ионов ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) в начальный момент 800 мг/л при температуре раствора 200 °С в течение 2 часов. Теплогидравлические испытания модели ПГ проведены в соответствии с Техническим заданием.

Для контура греющего теплоносителя (вода):

- давление на входе в парогенератор — 15,0 МПа;

- температура на входе в парогенератор — 302–310 °С.

Для контура нагреваемого теплоносителя:

- давление на выходе из парогенератора — 3,45–1,6 МПа;
- температура теплоносителя на входе в парогенератор — 50 °С

*Теплогидравлические испытания натурной модели секции парогенератор реактора SMART-P: отчёт о НИР / ФГУП «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин, Е.И. Трубкин; исполн. С.М. Никонов, В.И. Акинин, Л.А. Галимова. — Электрогорск, 2009. — 112 с. — Инв. №2.826.*

### **Исследование гидродинамики и теплообмена в кольцевых твэлах для ядерно-энергетических установок нового поколения**

*Руководитель темы д-р техн. наук В.Н. Блинков; отв. исполнитель д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов; исполнители: д-р техн. наук В.И. Мелихов, канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфенов, А.А. Неровнов, Р.Х. Хасанов, М.В. Давыдов, Н.А. Ртищев*

Цель работы состояла в изучении закономерностей гидродинамики и теплообмена в кольцевых твэлах для определения эффективности их применения в тепловыделяющих сборках АЭС с ВВЭР. Идея использования кольцевых твэлов в ядерной энергетике известна более 30 лет. Однако до сих пор они не применяются в энергетических реакторах. Тем не менее, работы по научно-техническому обоснованию их использования активно ведутся в мире последние 10 лет. Переход от традиционных твэлов к кольцевым практически удваивает поверхность теплообмена, примерно в два раза снижает толщину топливного слоя, что, учитывая теплообмен как с внутренней, так и внешней поверхности, приводит к четырехкратному снижению эффективного термического сопротивления топлива по сравнению с обычными твэлами. При этом максимальная температура топлива существенно снижается. Однако, для использования кольцевых твэлов в ядерной энергетике необходимо решить ряд важных проблем: определение запасов до кризиса на внешней и внутренней поверхностях твэлов, недопущение существенного возрастания гидросопротивления активной зоны реактора, изучение поведения твэлов при повторном заливе активной зоны. В отчете приводятся результаты выполненного обзора исследований по данной теме, на их основе разработан план дальнейших сравнительных и оптимизационных работ в этой области.

*Исследование гидродинамики и теплообмена в кольцевых твэлах для ядерно-энергетических установок нового поколения: отчет о НИР / НИУ «МЭИ»; рук. В.Н. Блинков; исполн.: О.И. Мелихов, В.И. Мелихов, Ю.В. Парфенов и др. — М., 2009. — 101 с. — Гос. рег. № 01201057336.*

**Анализ опыта эксплуатации и контроля энергетических масел на АЭС**  
*Руководитель работы канд. хим. наук Л.А. Галимова;*  
*исполнитель канд. хим. наук С.Г. Амбарцумян*

Представлены результаты проведенного анализа требований основных руководящих документов, отраслевых стандартов и тематических отечественных публикаций к трансформаторным и турбинным маслам, применяемым на АЭС для заливки силовых и измерительных трансформаторов, в системах смазки, уплотнения и регулирования турбоагрегатов, для обеспечения надёжной и безопасной эксплуатации энергетического оборудования. Представлены сравнительные характеристики и анализ эксплуатационных свойств различных марок трансформаторных, минеральных и синтетических огнестойких масел, применяемых на АЭС. Приведены правила приёмки и контроля качества товарных трансформаторных, минеральных и синтетических огнестойких турбинных масел, условия хранения и контроля свежих и регенерированных масел, порядок допуска масел к применению в оборудовании. Приведены требования к эксплуатации масел в оборудовании, способы и методы поддержания эксплуатационных свойств, нормы, объём и периодичность лабораторных испытаний, а также требования при регенерации трансформаторных и турбинных масел. Проведены результаты выполненного анализа опыта использования физико-химических показателей эксплуатационных масел для диагностики состояния энергетического оборудования, в том числе для обнаружения и идентификации дефектов, оценки состояния изоляции трансформаторов. Анализ используемых методов определения физико-химических показателей состояния трансформаторных и турбинных масел свидетельствует о необходимости (целесообразности) совершенствования и разработки дополнительных нормативных документов, в том числе отраслевого уровня, по методам выполнения измерений отдельных показателей качества эксплуатационных масел, планирования их пересмотра для обеспечения контроля при поставке, эксплуатации, очистке и утилизации энергетических масел применительно к условиям АЭС.

*Анализ опыта эксплуатации и контроля энергетических масел на АЭС: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Л.А. Галимова; исполн. С.Г. Амбарцумян. — Электрогорск, 2010. — 57 с. — Инв. №351.10.*

**Обобщение опыта испытаний на стенде ИОН-1 сильноосновных анионитов гелевой и макропористой структуры, используемых для загрузки фильтров конденсатоочистки АЭС. Подготовка предложений по использованию стенда ИОН-1**

*Руководитель работы канд. хим. наук Л.А. Галимова;*  
*исполнитель канд. хим. наук С.Г. Амбарцумян*

Объектом исследования являются ионообменные смолы (ИОС), используемые в процессах водоподготовки и очистки технологических сред АЭС.

Испытания ИОС, проводимые в условиях, приближенных к эксплуатационным, позволяют объективно оценить физическую стойкость ионитов, прогнозировать состояние смолы в реальных фильтрах при многократных регенерациях и гидрперегрузках, оптимизировать выбор ионообменных материалов для фильтров установок.

Представлены:

- результаты выполненного анализа требований основных руководящих документов, отраслевых стандартов к ИОС, применяемых на АЭС;
- требования при организации и проведении входного и эксплуатационного контроля ИОС, поставляемых на АЭС;
- результаты обобщения и систематизации полученных впервые экспериментальных данных по определению совместного показателя осмотической стабильности и механической прочности сильноосновных анионитов и сильнокислотных катионитов гелевой и макропористой структуры, используемых в системе конденсатоочистки АЭС, в динамических условиях, приближенных к эксплуатационным, на стенде ИОН-1, на основании которых разработаны методики совместного определения осмотической стабильности и механической прочности сильноосновных анионитов и сильнокислотных катионитов гелевой и макропористой структуры, используемых в системе конденсатоочистки;
- разработанные рекомендации и предложения по оценке качества и прогнозированию срока службы ионообменных материалов по совместному показателю осмотической стабильности и механической прочности, полученному в динамических условиях, приближенных к эксплуатационным.

*Обобщение опыта испытаний на стенде ИОН-1 сильноосновных анионитов гелевой и макропористой структуры, используемых для загрузки фильтров конденсатоочистки АЭС. Подготовка предложений по использованию стенда ИОН-1: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Л.А. Галимова; исполн. С.Г. Амбарцумян. — Электрогорск, 2010. — 46 с. — Инв. №372.10.*

# НИОКР ОАО «ЭНИЦ» — АО «ЭНИЦ» 2011–2017 гг.

## Работы применительно к ВВЭР

### **Анализ влияния проектных решений на эрозионно-коррозионную стойкость трубопроводов действующих АЭС**

*Исполнители: доктор техн. наук Г.В. Томаров, инженеры О.А. Беляков, С.В. Сергеев*

Объектом исследования являются трубопроводы второго контура атомных электрических станций с реакторами ВВЭР.

Цель работы — подготовка изменений в эксплуатационную документацию.

Метод исследования — анализ эксплуатационных данных неразрушающего контроля трубопроводов и оборудования второго контура АЭС.

В работе представлены обобщённые и систематизированные материалы по оптимизации и планированию эксплуатационного контроля технического состояния металла трубопроводов и оборудования второго контура АЭС.

*Анализ влияния проектных решений на эрозионно-коррозионную стойкость трубопроводов действующих АЭС: отчет о НИР/ОАО «ЭНИЦ»; исполн.: Г.В. Томаров, О.А. Беляков, С.В. Сергеев. — Электрогорск, 2011. — 119 с. — Инв. № 379/11.*

### **Анализ результатов испытаний систем измерения уровня воды в парогенераторах блока I Ростовской АЭС**

*Руководитель работы д-р техн. наук А.Г. Агеев;*

*исполнители: канд. техн. наук Б.М. Корольков, инженер Г.Б. Кожаринова*

В работе представлены результаты:

- анализа работы систем измерения уровня воды в парогенераторах ПГВ-1000М до и после модернизации системы водопитания и предложены рекомендации по повышению точности и надёжности работы измерительных систем;
- анализа проведённых работ по наладке и испытаниям систем измерения уровня воды в ПГ блока I Волгодонской АЭС на различных этапах освоения проектной мощности;
- анализа зависимости показаний уровнемеров от паропроизводительности ПГ. Зависимость имеет традиционный вид, при этом на мощности 100% однокамерные уровнемеры показывают в среднем на 80 мм ниже номинального уровня (2320 мм), а уровнемеры L33 на ПГ-1, ПГ-2, ПГ-4 показывают в среднем на 260 мм выше номинального уровня (2660 мм), а на ПГ-3 — на 350 мм выше (2750 мм). По результатам тарировки уровнемеров ПГ рекомендуется поддерживать номинальный уровень в ПГ в пределах от 2350 до 2450 мм по уровнемеру L19.

В целях повышения надёжности работы системы измерения уровня воды в ПГ необходимо в соответствии с программными документами выполнять тарировки уровнемеров ПГ в режиме «горячее состояние», в также проверку их показаний при работе блока на мощности с помощью датчиков контроля уровня с применением высокоточных анализаторов натрия.

*Анализ результатов испытаний систем измерения уровня воды в парогенераторах блока I Ростовской АЭС: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. А.Г. Агеев; исполн.: Б.М. Корольков, Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2011. — 71 с. — Инв. № 379а/11.*

### **Проведение экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР по моделированию течей из трубопроводов, соединяющих ГЕ-2 с реакторным контуром при мощности стенда 1,5 МВт**

*Руководитель темы д-р техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнитель канд. техн. наук С.М. Никонов*

Представлены результаты выполненного на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР эксперимента с имитацией малой течи 0,35% из «холодного» трубопровода при наложении потери всех источников переменного тока и работой пассивных систем безопасности.

Анализ результатов эксперимента показал:

- через 4 с после запуска системы ГЕ-2 устанавливается требуемый средний расход охлаждающей воды, а устойчивый расход охлаждающей воды из системы ГЕ-2 устанавливается после обезвоживания уравнительных линий;
- во время выполнения эксперимента отмечена высокая эффективность работы системы СПОТ и её большое влияние на процессы конденсации в парогенераторах;
- в условиях выполненного эксперимента неконденсирующиеся газы не оказывают заметного влияния на теплоотвод от первого контура в парогенераторах;
- экспериментально показано, что в результате совместной работы пассивных систем – ГЕ-2 и СПОТ температура поверхности имитаторов ТВЭЛ поддерживается на требуемом уровне.

Отмечается, что экспериментальные результаты, полученные на стенде ПСБ-ВВЭР, убедительно показывают эффективность работы пассивных систем безопасности (ГЕ-2 и СПОТ ПГ) с точки зрения выполнения критических функций безопасности, а именно, поддержание температуры поверхности ТВЭЛ на безопасном уровне.

*Проведение экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР по моделированию течей из трубопроводов, соединяющих ГЕ-2 с реакторным контуром при мощности стенда 1,5 МВт: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн. С.М. Никонов. — Электрогорск, 2011. — 102 с. — Инв. № 382/11.*

**Анализ полученных на стенде ПСБ-ВВЭР экспериментальных данных, обоснование переноса результатов эксперимента с разрывом «холодного» трубопровода на натуральный объект – РУ НВ АЭС-2, выработка рекомендаций по оптимизации проектных характеристик пассивных систем безопасности НВ АЭС-2**

*Руководитель темы д-р техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнитель канд. техн. наук С.М. Никонов*

Представлены результаты выполненного на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР эксперимента с имитацией двустороннего разрыва (2×100%) «холодного» трубопровода при наложении потери всех источников переменного тока и работе пассивных систем безопасности.

Анализ результатов эксперимента показал, что:

- через 5 с после запуска системы ГЕ-2 устанавливается требуемый средний расход охлаждающей воды, а устойчивый расход охлаждающей воды из системы ГЕ-2 устанавливается после обезвоживания уравнивающих линий;
- во время выполнения эксперимента отмечена высокая эффективность работы системы СПОТ и её большое влияние на процессы конденсации в парогенераторах;
- в условиях выполненного эксперимента неконденсирующиеся газы не оказывают заметного влияния на теплоотвод от первого контура в парогенераторах;
- экспериментально получено, что в результате совместной работы пассивных систем – ГЕ-2 и СПОТ температура поверхности имитаторов твэл поддерживается на требуемом уровне.

Экспериментальные результаты, полученные на стенде ПСБ-ВВЭР, убедительно показывают эффективность работы пассивных систем безопасности (ГЕ-2 и СПОТ ПГ) с точки зрения выполнения критических функций безопасности, а именно поддержание температуры поверхности твэл на безопасном уровне.

Отмечается необходимость выполнения эксперимента на установке ПСБ-ВВЭР продолжительностью 72 часа и оптимизации расходной характеристики ГЕ-2.

*Анализ полученных на стенде ПСБ-ВВЭР экспериментальных данных, обоснование переноса результатов эксперимента с разрывом «холодного» трубопровода на натуральный объект – РУ НВ АЭС-2, выработка рекомендаций по оптимизации проектных характеристик пассивных систем безопасности НВ АЭС-2: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн. С.М. Никонов. — Электрогорск, 2011. — 111 с. — Инв. № 383/11.*

## **Анализ результатов исследования циркуляционных характеристик парогенераторов блока 1 Балаковской АЭС с целью поиска путей увеличения надёжности работы теплообменного пучка**

*Научный руководитель темы д-р техн. наук А.Г. Агеев;  
руководитель работы канд. техн. наук Б.М. Корольков;  
исполнитель инженер Г.Б. Кожаринова*

Представлены данные анализа результатов предшествующих исследований циркуляции в водяном объёме ПГВ-1000 штатного исполнения головного блока АЭС с ВВЭР. Выявлен сложный характер циркуляционных процессов в исследованных зонах объёма парогенератора с участками подъёмного движения вблизи входного коллектора и с периодическим изменением направления потока в остальных зонах.

Опытные данные по изменению кратности циркуляции вдоль теплообменного пучка согласуются с результатами её расчётного определения, что подтверждает правильность основных предпосылок, принятых при выполненных расчётах.

Полученные данные использованы при разработке проекта размещения датчиков скорости и паросодержания в характерных зонах ПГ-4 блока 1 Балаковской АЭС.

Представлены результаты выполненных исследований паросодержаний, скоростей и направления потока в различных зонах водяного объёма ПГ-4 блока 1 Балаковской АЭС, проведённых с целью проверки эффективности технического решения, предусматривающего установку дополнительных ПДЛ над зазором между корпусом и закраиной на стороне входного коллектора теплоносителя и направленного на ликвидацию выброса пара из-под закраины ПДЛ в этой зоне парогенератора.

Рассмотрены результаты проведённых испытаний парогенератора ПГВ-1000 после реконструкции системы раздачи питательной воды, предусматривающей подачу части питательной воды в «опускной» коридор вблизи «горячего» коллектора для увеличения интенсивности циркуляции воды и улучшения работы теплообменного пучка в этой зоне парогенератора.

Показано, что при всех значениях мощности кратность циркуляции, определённая солевым методом вблизи «горячего» коллектора в парогенераторе с реконструированной системой водопитания, выше, чем в ПГ штатного исполнения. При номинальной мощности блока увеличение кратности циркуляции составляет приблизительно 40%, что практически согласуется с расчётными оценками, выполненными ОАО «ЭНИЦ» и ОАО ОКБ «Гидропресс».

Отмечается, что полученные на Балаковской АЭС результаты сравнительных испытаний ПГ со штатной и модернизированной системой водопитания и их значительный объём и воспроизводимость позволяют рекомендовать предложенные конструктивные решения для внедрения как

на действующих, так и на вновь вводимых в эксплуатацию блоках АЭС с ВВЭР-1000.

*Анализ результатов исследования циркуляционных характеристик парогенераторов блока 1 Балаковской АЭС с целью поиска путей увеличения надёжности работы теплообменного пучка: отчет о НИР/ОАО «ЭНИЦ»; рук.: А.Г. Агеев, Б.М. Корольков; исполн. Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2011. — 135 с. — Инв. № 388/11.*

### **Анализ путей улучшения сепарационных характеристик парогенераторов ПГВ-1000**

*Руководитель работы канд. техн. наук Б.М. Корольков; научный руководитель темы д-р техн. наук А.Г. Агеев; исполнитель инженер Г.Б. Кожаринова*

В работе рассмотрены пути дальнейшей модернизации штатной сепарационной схемы парогенераторов ПГВ-1000 для обеспечения надёжной и безопасной эксплуатации РУ на повышенном уровне мощности:

- за счёт применения ПДЛ с безбарботажными насадками, отводящими пар из-под горизонтальной пластины листа в паровой объём выше уровня воды;
- за счёт применения ПДЛ с переменной перфорацией, соответствующей изменению нагрузки теплообменного пучка по сечению парогенератора.

Приведены данные испытаний элементов ПДЛ с насадками различного диаметра, проведённых на стендах ОАО «ЭНИЦ» и ОАО ОКБ «Гидропресс». Показано, что применение в сепарационной схеме парогенератора ПДЛ с насадками обеспечивает увеличение паровой нагрузки более, чем в два раза по сравнению со штатной сепарационной схемой, а также повышение предельного положения уровня воды над ПДЛ с 200 мм — для штатной схемы до 500 мм. Обоснована целесообразность проведения испытания парогенератора, оснащённого ПДЛ с безбарботажными насадками, на блоках ВВЭР-1000.

Приведены результаты испытаний парогенератора с жалюзийным сепаратором 1 блока Хмельницкой АЭС с модернизированной системой водопитания и продувки и оборудованного ПДЛ с безбарботажными инерционными насадками диаметром 80 мм. Показано, что в диапазоне изменения уровня по уровнемеру L19 от 2330 до 2570 мм влажность пара в паропроводе составляет не более 0,1%. При этом, влажность пара на входе в жалюзи также менее 0,1%, что подтверждает целесообразность замены жалюзи потолочным дырчатым щитом.

Выполнен анализ результатов сепарационных испытаний парогенератора, оснащённого ПДЛ с насадками диаметром 120 мм, 1 блока Ростовской АЭС при номинальной мощности. Испытания этого ПГ, в целом, дали положительный результат.

Показано, что применение ПДЛ с насадками в сепарационной схеме ПГ позволяет существенно увеличить диапазон допустимого изменения уровня

над ПДЛ, что позволяет рассмотреть возможность поддержания уровня в ПГ по показаниям уровнемера, измеряющего уровень над ПДЛ и непосредственно влияющего на вынос влаги и безопасность работы турбоустановки.

Отмечается, что для нормализации процессов паросепарации в ПГ с ПДЛ с насадками при низких уровнях воды в обязательном порядке должна быть установлена вертикальная заглушка на «холодном» торце высотой, равной высоте закраины ПДЛ, а также полностью удалена закраина на стороне «горячего» коллектора, как это принято в проекте АЭС-2006.

Показано, что улучшение сепарационных характеристик ПГВ-1000 при повышенной паропроизводительности возможно за счет применения в сепарационной схеме погруженного дырчатого листа с переменной перфорацией, позволяющего уменьшить остаточную неравномерность нагрузки зеркала испарения. Представлена приближённая методика расчета переменной перфорации ПДЛ и выполнен расчет применительно к ПГВ-1000. В настоящий момент методика проходит проверку на экспериментальном стенде ОАО «ЭНИЦ», после чего предполагается ее апробация на парогенераторе одного из блоков ВВЭР-1000.

*Анализ путей улучшения сепарационных характеристик парогенераторов ПГВ-1000: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук.: Б.М. Корольков, А.Г. Агеев; исполн. Г.Б. Кожаринова. — Электрогорск, 2011. — 68 с. — Инв. № 389/11.*

### **Разработка технических предложений по антидебризной защите кассет ВВЭР-440, ВВЭР-1000, ВВЭР-1000А с креплением твэлов сверху и снизу, с увеличенной длиной активной зоны и экспериментальные исследования антидебризных устройств кассет ВВЭР-440**

*Руководитель работы инженер В.С. Курсков;*

*исполнители: д-р техн. наук В.А. Гашенко, инженер О.Н. Абакумова*

В работе представлены технические предложения по антидебризной защите кассет ВВЭР-440, ВВЭР-1000, ВВЭР-1000А с креплением части твэлов сверху и опорой части твэлов снизу, с увеличенной длиной активной зоны за счёт изменения габаритных размеров хвостовика.

Представлены результаты сравнительных гидравлических испытаний макета ТВС ВВЭР-440 с креплением части твэлов сверху и опорой части твэлов снизу при наличии антидебризного фильтра (АДФ) и антидебризного устройства, полученные на стенде «Фильтр-1» ОАО «ЭНИЦ» при расходе теплоносителя до 150 м<sup>3</sup>/ч. Определена антидебризная защищённость кассеты при наличии АДФ и антидебризного устройства.

Отмечается, что впервые в отечественной практике в данной области исследований:

- разработаны технические предложения по модернизации конструкции кассет;

- измерены перепады давления на макете ТВС ВВЭР-440 с креплением части твэлов сверху и опорой части твэлов снизу с различными вариантами антидебризной защиты;
- проведена оценка степени защиты ТВС ВВЭР-440 от дебриса.

Полученные результаты работы могут быть использованы при принятии решений по изменению конструкции кассет ТВС ВВЭР-440, -1000 и -1000А в части крепления твэлов, изменения габаритных размеров нижнего узла, увеличения длины активной зоны с целью улучшения её термомеханических и физических характеристик.

*Разработка технических предложений по антидебризной защите кассет ВВЭР-440, ВВЭР-1000, ВВЭР-1000А с креплением твэлов сверху и снизу, с увеличенной длиной активной зоны и экспериментальные исследования антидебризных устройств кассет ВВЭР-440: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. В.С. Курсков; исполн.: В.А. Гашенко, О.Н. Абакумова. — Электрогорск, 2011. — 38 с. — Инв. № 121.1.831.*

### **Экспериментальное исследование уменьшенных моделей эжекторов с тангенциальным подводом перекачиваемой среды применительно к системам аварийного и планового расхолаживания реакторной установки (САПР-РУ) проекта АЭС-2006. Ресурсные испытания материалов эжектора в рабочих условиях**

*Руководители работы: д-р техн. наук И.В. Ёлкин, д-р техн. наук В.И. Мелихов, канд. техн. наук Е.Н. Трубкин, С.М. Никонов, канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфёнов*

В работе представлены результаты экспериментального исследования расходно-напорных характеристик моделей эжекторов с тангенциальным подводом перекачиваемой среды. Модели выполнены в масштабе 1:27,7 (по проходным сечениям к натурной модели) применительно к системе аварийного и планового расхолаживания первого контура РУ (САПР-РУ). Представлены результаты ресурсных испытаний материалов (08X18H10T, Ti, W, ЭИ-612) на стойкость эрозионному и механическому износу в рабочих условиях эжектора.

Кроме того, приведена разработанная методика расчёта расходно-напорной характеристики эжектора с тангенциальным подводом пассивной воды.

Приведены экспериментально полученные:

- расходно-напорные характеристики трёх эжекторов, отличающихся угловой скоростью пассивной воды в приёмной камере эжектора;
- характеристики изнашиваемости материалов от времени.

Опыты по определению расходно-напорных характеристик и эрозионной стойкости материалов выполнены при следующих параметрах:

- Рабочая среда (вода):
  - ✧ давление 5,5–6,5 МПа;
  - ✧ температура 20–60 °С;
  - ✧ расход 3,0–3,1 кг/с.

- Пассивная среда (вода):
  - ✧ давление 0,140–0,145 МПа
  - ✧ температура 20–60 °С.

Опытами установлено, что:

- производительность эжекторов с тангенциальным подводом пассивной среды зависит от ее угловой скорости в приемной камере. С увеличением угловой скорости производительность эжектора снижается. Максимальная производительность эжектора при срабатывании противокавитационного перепада в приемной камере ( $\omega=80$  1/с) составила в перерасчете на натурную модель 410–420 м<sup>3</sup>/ч;
- массовая скорость эрозионного износа материалов при выбранных параметрах составила:
 

✧ для стали 08X18H10T	0,0358 г/м <sup>2</sup> ·ч
✧ для титана	0,00985 г/м <sup>2</sup> ·ч
✧ для вольфрама	2,183 г/м <sup>2</sup> ·ч
✧ для стали ЭИ-612	$9,96 \times 10^{-4}$ г/м <sup>2</sup> ·ч

*Экспериментальное исследование уменьшенных моделей эжекторов с тангенциальным подводом перекачиваемой среды применительно к системам аварийного и планового расхолаживания реакторной установки (САПР-РУ) проекта АЭС-2006. Ресурсные испытания материалов эжектора в рабочих условиях: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: В.И. Мелихов, Е.Н. Трубкин, С.М. Никонов, Ю.В. Парфёнов. — Электрогорск, 2011. — 75 с. — Инв. № 111.1.830.*

### **Проведение испытаний на крупномасштабной модели ПГ АЭС с ВВЭР-1000 для определения параметров режима консервации парогенератора методом «сухого останова»**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.А. Гашенко;*

*исполнители: инженеры А.Р. Преловский, Е.В. Муравьёв, О.В. Шатерникова, В.А. Сафронов*

Отмечается, что в настоящее время осушение ПГ по второму контуру проводится за счёт остаточного тепла металла при температуре дренирования 80 °С с естественной вентиляцией при открытом клапане БРУ-А или с помощью «горячего» воздуха, подаваемого в люк-лаз от калориферов.

С целью совершенствования технологии консервации ПГ методом «сухого останова», а также для снижения время-затрат в графике ППР, обусловленных производством работ по осушению ПГ, предлагается выполнить удаление влаги из ПГ в режиме «полного осушения по второму контуру» при останове РУ. Для оценки возможности расхолаживания ПГ сжатым воздухом ОАО «ОКБ Гидропресс» предварительно проведены работы по термометрированию корпуса ПГ на реальном блоке, а также тепловые расчёты.

Основные результаты:

- расхолаживание ПГ по времени лимитируется остыванием более массивного корпуса, а для охлаждения трубчатки ПГ требуется существенно меньшее время;

- на основании данных термометрирования на энергоблоке № 4 Нововоронежской АЭС пересчитан коэффициент теплоотдачи для корпуса ПГ, который составляет  $3,0 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  при кратности воздухообмена 1,5 объёма ПГ в час;
- тепловым расчётом показано, что для снижения температуры корпуса ПГ до  $40^\circ\text{C}$  потребуется менее 2 суток при вентилировании воздухом и более 5,5 суток при естественном остывании.

Целью работы является получение на крупномасштабной модели фактических параметров протекания режима «сухого останова» для дальнейшей отработки технологии консервации и разработки требований к технологии осушения ПГ по второму контуру.

Приводятся результаты проведённых экспериментов, позволившие сопоставить скорости остывания корпуса модели ПГ в двух режимах: при естественном остывании и при осушке воздухом (расход —  $30 \text{ м}^3/\text{час}$ ) в диапазоне температур от плюс  $80$  до плюс  $40^\circ\text{C}$ . В первом случае температура снижалась за 75 часов, во втором — за 49 часов, то есть в 1,5 раза быстрее. Отмечается, что для имитации эксплуатационных отклонений перед началом испытаний в модель парогенератора через верхний штуцер был введён порошкообразный гематит в количестве 20 кг.

Для сопоставления данных в большем диапазоне температур необходимо провести дополнительные испытания.

В работе представлена также «Методика исследования коррозионных процессов, протекающих на поверхности трубчатки ПГ АЭС с ВВЭР-1000 при высушивании слоя отложений», разработанная в рамках ТЗ к работе.

*Проведение испытаний на крупномасштабной модели ПГ АЭС с ВВЭР-1000 для определения параметров режима консервации парогенератора методом «сухого останова: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. В.А. Гашенко; исполн.: А.Р. Преловский, Е.В. Муравьев, О.В. Шатерникова, В.А. Сафронов. — Электрогорск, 2011. — 28 с. — Инв. № 400/11.*

**Анализ ранее выполненных экспериментов и обоснование объёма экспериментальных работ. Разработка сценариев экспериментов.**

**Подготовка и согласование списка верифицируемых параметров.**

**Выполнение предварительных расчётов для РУ и стенда ПСБ-ВВЭР**

*Руководитель темы д-р техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнитель канд. техн. наук С.М. Никонов*

В работе представлены результаты анализа ранее проведенных экспериментов на стенде ПСБ ВВЭР. На основе этого анализа и требований проекта ВВЭР-ТОИ выбраны системы, которые необходимо реконструировать для целей проекта ВВЭР-ТОИ.

Представлены результаты выполненного для РУ ВВЭР-ТОИ теплогидравлического анализа проектных аварий с разрывом трубопроводов первого контура:

- частичный разрыв «холодной» нитки петли № 3 эквивалентным диаметром Ду 25;
- частичный разрыв «холодной» нитки петли № 3 эквивалентным диаметром Ду 65;
- частичный разрыв «холодной» нитки петли № 3 эквивалентным диаметром Ду 100;
- разрыв трубопровода впрыска в КД диаметром Ду 179;
- разрыв дыхательного трубопровода КД диаметром Ду 346;
- разрыв «холодной» нитки петли № 3 на входе в реактор;
- разрыв «горячей» нитки петли № 3 на выходе из реактора.

На основе результатов теплогидравлического анализа выбраны три сценария аварийных режимов для стенда ПСБ-ВВЭР:

- частичный разрыв «холодной» нитки эквивалентным диаметром Ду 65;
- разрыв (гильтинный) дыхательного трубопровода КД диаметром Ду 346;
- разрыв (гильтинный) «холодной» нитки на входе в реактор Ду 850.

Представлены результаты выполненной адаптации выбранных сценариев к условиям стенда ПСБ-ВВЭР. Отмечается, что в качестве эксперимента для организации стандартной задачи в рамках потребностей проекта АЭС с ВВЭР-ТОИ для верификации расчётных кодов ТРАП, КОРСАР, СОКРАТ предложен эксперимент «Малая течь из «холодного» трубопровода эквивалентным диаметром Ду 65». Представлен разработанный для выполнения данной стандартной задачи список верифицируемых параметров.

*Анализ ранее выполненных экспериментов и обоснование объёма экспериментальных работ. Разработка сценариев экспериментов. Подготовка и согласование списка верифицируемых параметров. Выполнение предварительных расчётов для РУ и стенда ПСБ-ВВЭР: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн. С.М. Никонов. — Электрогорск, 2011. — 194 с. — Инв. № 420/13.*

### **Валидация кода СОКРАТ на опытных данных эксперимента на стенде ПСБ-ВВЭР по исследованию аварийного режима с течью Ду 65 из холодной нитки РУ ВВЭР-ТОИ**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Мелихов;  
исполнитель канд. техн. наук А.В. Капустин*

В работе представлены результаты посттест-анализа кодом СОКРАТ двух первых стадий эксперимента на стенде ПСБ-ВВЭР, моделирующего аварийный режим с малой течью Ду 65 из холодной нитки РУ ВВЭР-ТОИ: от начала эксперимента до первого разогрева и от первого разогрева до конца слива гидроёмкостей первой ступени. Отмечается, что первая стадия воспроизведена в расчёте с достаточно хорошей точностью.

На второй стадии код предсказывает меньшую скорость слива воды из гидроёмкостей САОЗ (первой ступени), чем в эксперименте, что, предположительно, является следствием ограничения модели гидроёмкостей

кода СОКРАТ. Ограничение заключается в том, что модель гидроёмкостей кода СОКРАТ не позволяет изменить соотношение объёма гидроёмкости к объёму металла, которое на стенде больше, чем в реакторной установке. Это приводит к недооценке теплового потока от металла к газу в гидроёмкости. В результате отличий в скорости слива воды из гидроёмкостей САОЗ в расчёте происходит более глубокое уменьшение уровня воды в активной зоне и значительно более выраженный разогрев оболочки, чем в эксперименте.

На основании анализа для получения более корректных результатов рекомендуется средствами входного набора попытаться скомпенсировать недооценённый в расчёте теплообмен от металла к газу.

*Валидация кода СОКРАТ на опытных данных эксперимента на стенде ПСБ-ВВЭР по исследованию аварийного режима с течью Ду 65 из холодной нитки РУ ВВЭР-ТОИ: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн. А.В. Капустин. — Электрогорск, 2012. — 73 с. — Инв. № 111.2.838.*

### **Разработка перечня входных неопределённостей для замыкающих соотношений и начальных условий для анализа неопределённости результатов расчёта аварийного режима «Большая течь вследствие гильотинного разрыва ГЦТ РУ ВВЭР-ТОИ на входе в реактор с потерей всех источников переменного тока длительностью 72 часа кодом СОКРАТ»**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Мелихов;  
исполнитель канд. техн. наук А.В. Капустин*

В работе представлен перечень входных неопределённостей для замыкающих соотношений и начальных условий для анализа неопределённости результатов расчёта аварийного режима «Большая течь вследствие гильотинного разрыва ГЦТ РУ ВВЭР-ТОИ на входе в реактор с потерей всех источников переменного тока длительностью 72 часа». Отмечается, что целевой функцией анализа неопределённости является максимальная температура оболочки твэлов. Диапазон варьирования начальных условий выбран с учётом проектных значений погрешности поддержания заданных параметров РУ ВВЭР-ТОИ. Диапазон варьирования параметров замыкающих соотношений выбирается с учётом особенностей моделей и результатов верификации кода СОКРАТ.

Для разработки перечня варьируемых параметров выполнена процедура идентификации и ранжирования явлений (что в англоязычной литературе называется Phenomena Identification and Ranking Table или PIRT), а также использован опыт международного проекта BEMUSE (Best Estimate Methods Uncertainty and Sensitivity Evaluation).

Для оценки неопределённости применён метод GRS с использованием формулы Вилкса.

*Разработка перечня входных неопределённостей для замыкающих соотношений и начальных условий для анализа неопределённости результатов расчёта аварийного*

*режима «Большая течь вследствие гильотинного разрыва ГЦТ РУ ВВЭР-ТОИ на входе в реактор с потерей всех источников переменного тока длительностью 72 часа» кодом СОКРАТ: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн. А.В. Капустин. — Электрогорск, 2012. — 31 с. — Инв. № 111.2.837.*

### **Отработка технологии консервации ПГ АЭС с ВВЭР-1000 в режимах пуска, останова блока и в стояночных режимах**

*Руководитель темы инженер А.Р. Преловский;*

*исполнители: инженеры Е.В. Муравьев, О.В. Шатерникова*

Отмечается, что в работе исследованы режимы консервации методом «сухого» останова при естественном остывании ПГ и подаче воздуха в объём ПГ с расходом 60 м<sup>3</sup>/ч. Сопоставлены скорости остывания корпуса модели ПГ в трёх режимах:

- при естественном остывании,
- при осушке воздухом с расходом 30 м<sup>3</sup>/ч,
- при осушке воздухом с расходом 60 м<sup>3</sup>/ч.

Приводятся графики изменения температуры корпуса ПГ в трёх режимах для диапазона температур нижней части модели ПГ от 140 до 40 °С, из которых следует, что в первом режиме температура нижней части модели ПГ снижалась со 140 до 40 °С за 107 часов, во втором — за 74 часа, в третьем — за 55 часов. Аппроксимация полученных данных позволяет определить время, необходимое для остывания модели ПГ при различных значениях расхода воздуха, подаваемого в корпус ПГ для охлаждения.

Полученные в 2011–2012 гг. результаты по скорости остывания крупномасштабной модели ПГ в естественных условиях и в условиях принудительной подачи воздуха подтвердили эффективность и перспективность практической реализации такого способа охлаждения штатного ПГ, как важной процедуры при выполнении «сухой» консервации.

*Отработка технологии консервации ПГ АЭС с ВВЭР-1000 в режимах пуска, останова блока и в стояночных режимах: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. А.Р. Преловский; исполн.: Е.В. Муравьев, О.В. Шатерникова. — Электрогорск, 2012. — 26 с. — Инв. № 416/12.*

### **Определение теплогидравлических и сепарационных характеристик парогенератора повышенной мощности для АЭС с ВВЭР**

*Руководитель темы д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов;*

*отв. исполнитель — д-р техн. наук В.И. Мелихов;*

*исполнители: канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфенов, Н.А. Ртищев, А.А. Неровнов, Д.А. Емельянов*

Цель работы состояла в определении теплогидравлических и сепарационных характеристик горизонтального парогенератора повышенной мощности для АЭС с ВВЭР-1200. Горизонтальный парогенератор данного проекта отличается от парогенератора, используемого на АЭС с ВВЭР-1000, конструкцией пучка теплообменных труб и увеличенным диаметром корпуса.

В отчете приводятся результаты работы, в ходе которой было разработано трехмерное расчетное программное средство для анализа теплогидравлических и сепарационных характеристик в горизонтальном парогенераторе повышенной мощности, была проведена валидация программного средства по результатам исследований на интегральных экспериментальных стендах и натуральных парогенераторах. Математическая модель программного средства основана на методах механики многофазных сред, валидация программного средства проводилась по результатам исследований на экспериментальных установках АО «ЭНИЦ» и ОКБ «Гидропресс». В отчете представлены теплогидравлические и сепарационные характеристики различных вариантов конструкции горизонтального парогенератора для АЭС с ВВЭР-1200.

*Определение теплогидравлических и сепарационных характеристик парогенератора повышенной мощности для АЭС с ВВЭР по теме 2111100: отчет о НИР / «НИУ «МЭИ»; рук. О.И. Мелихов; исполн.: В.И. Мелихов, Ю.В. Парфенов, Н.А. Ртищев, А.А. Неровнов, Д.А. Емельянов. — М., 2012. — 39 с. — Гос. рег. № 01201058895.*

### **Теплофизическое обоснование устройства локализации расплава для инновационных проектов АЭС с ВВЭР**

*Руководитель темы д-р техн. наук В.И. Мелихов;  
отв. исполнитель канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфенов;  
исполнители: д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов, канд. техн. наук  
А.А. Неровнов, Н.А. Ртищев, Д.А. Емельянов*

Цель работы состояла в расчете динамических воздействий на бетонную шахту реактора в ходе взаимодействия высокотемпературного расплава с охладителем с помощью многофазного кода VAPEX, разработанного в АО «ЭНИЦ» и «НИУ «МЭИ». Код VAPEX предназначенный для анализа взаимодействия высокотемпературного расплава с охладителем, был валидирован по результатам экспериментальных исследований на зарубежных экспериментальных установках MAGICO, QUEOS, FARO. В ходе работы была показана возможность организации устройства локализации расплава в виде так называемой «мокрой» ловушки, то есть слоя воды в шахте реактора, который будет обеспечивать эффективный теплоотвод от упавшего туда кориума. Определен оптимальный диапазон конструктивных и теплофизических параметров подобного устройства локализации. Показано, что при уменьшении уровня воды в шахте до 1 м существенно уменьшаются динамические воздействия на шахту реактора, вызванные паровым взрывом.

*Теплофизическое обоснование устройства локализации расплава для инновационных проектов АЭС с ВВЭР по теме 2286100: отчет о НИР / «НИУ «МЭИ»; рук. В.И. Мелихов; исполн.: Ю.В. Парфенов, О.И. Мелихов, А.А. Неровнов, Н.А. Ртищев, Д.А. Емельянов. — М., 2012. — 63 с. — Гос. рег. № 01201063264.*

## **Оптимизация двухфазной гидродинамики в горизонтальном парогенераторе водо-водяного ядерно-энергетического реактора нового поколения ВВЭР-1500/1600 на основе математического моделирования**

*Руководитель темы канд. физ.-мат. наук Ю.В. Парфенов;  
отв. исполнитель д-р техн. наук В.И. Мелихов;  
исполнители: д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов, канд. техн. наук  
Н.А. Ртищев, А.А. Неровнов, Д.А. Емельянов*

Цель работы состояла в определении теплогидравлических характеристик горизонтального парогенератора повышенной мощности для проекта АЭС с ВВЭР-1500/1600, возможность разработки которого анализировалась специалистами ОКБ «Гидропресс» в конце 90-х, начале 2000-х годов. При разработке конструкции горизонтального парогенератора для АЭС с ВВЭР-1500/1600 обеспечивался принцип эволюционного развития и совершенствования конструкций парогенераторов для АЭС с ВВЭР-1000, однако горизонтальный парогенератор для АЭС с ВВЭР-1500/1600 отличался от парогенератора для АЭС с ВВЭР-1000, в частности, увеличенным диаметром корпуса (внутренний диаметр 4,8 м) и коридорной компоновкой трубного пучка. В отчете представлены основные выводы работы, в ходе которой было разработано трехмерное расчетное программное средство для моделирования теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе АЭС с ВВЭР-1500/1600. Математическая модель основана на негомогенном неравновесном описании течения пароводяной смеси с применением концепции пористой среды для описания трубчатки и внутрикорпусных устройств ПГ. В ходе работы была проведена валидация расчетного программного средства на результатах экспериментов, выполненных на экспериментальных установках ОКБ «Гидропресс» и АО «ЭНИЦ». В отчете представлены теплотехнические параметры различных вариантов конструкции горизонтальных парогенераторов для АЭС с ВВЭР-1500, основные результаты теплогидравлических расчетов.

*Оптимизация двухфазной гидродинамики в горизонтальном парогенераторе водо-водяного ядерно-энергетического реактора нового поколения ВВЭР-1500/1600 на основе математического моделирования: отчет о НИР / «НИУ «МЭИ»; рук. Ю.В. Парфенов, исполн.: В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, Н.А. Ртищев, А.А. Неровнов, Д.А. Емельянов. — М., 2012. — 32 с. — № 01201060613.*

## **Результаты экспериментов с моделированием гильотинного разрыва дыхательного трубопровода компенсатора давления**

*Руководитель темы д-р техн. наук И.В. Ёлкин;  
исполнители: канд. техн. наук С.М. Никонов, инженер Д.И. Дорофеев,  
А.В. Басов*

Приводятся результаты выполненных на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР экспериментов с моделированием гильотинного разрыва дыхатель-

ного трубопровода компенсатора давления при наложении потери всех источников переменного тока и работе пассивных систем безопасности.

Отмечается, что в эксперименте на установке ПСБ-ВВЭР проявились явления, которые могут возникнуть и на реальном блоке: накопление конденсата в паропроводах и, соответственно, снижение массы воды во втором контуре, а также отравление теплообменников СПОТ.

Анализ результатов эксперимента показал, что:

- в результате совместной работы пассивных систем – ГЕ-1, ГЕ-2 и СПОТ температура поверхности имитаторов твэл поддерживается на безопасном уровне в течение 72 часов;
- в условиях выполненного эксперимента неконденсирующиеся газы не оказывают заметного влияния на теплоотвод от первого контура в парогенераторах;
- отравление парогенераторов в эксперименте, т.е. потеря конденсационной мощности парогенераторами, не отмечены, тем самым показана эффективность работы пассивных систем безопасности, предусмотренных в проекте ВВЭР-ТОИ с точки зрения выполнения критических функций безопасности, а именно поддержание температуры поверхности твэл на безопасном уровне.

*Результаты экспериментов с моделированием гильотинного разрыва дыхательного трубопровода компенсатора давления: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. И.В. Ёлкин; исполн.: С.М. Никонов, Д.И. Дорофеев, А.В. Басов. — Электрогорск, 2012. — 120 с. — Инв. № 421/13.*

## **Верификация расчётных кодов ТРАП-КС, КОРСАР/ГП и СОКРАТ на основе экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР**

*Руководитель темы д-р техн. наук И.В. Ёлкин;*

*исполнители: д-р техн. наук В.И. Мелихов, канд. физ-мат. наук*

*Ю.В. Парфёнов, канд. техн. наук С.М. Никонов, инженеры Д.И. Дорофеев,*

*А.В. Басов*

В работе отмечается, что с целью верификации расчётных кодов ТРАП-КС, КОРСАР/ГП и СОКРАТ проведены претест расчёты эксперимента с малой течью теплоносителя на стенде ПСБ-ВВЭР. Эксперимент моделирует аварию с течью теплоносителя из холодной нитки ГЦТ ВВЭР ТОИ с площадью проходного сечения эквивалентной Ду 65 в условиях полной потери источников переменного тока.

Приведен анализ результатов, полученных в расчётах по комплексу ТРАП-КС, которые хорошо совпадают с результатами экспериментов. Результаты расчёта начальной стадии аварии практически находятся внутри интервала, обусловленного погрешностями измерительных приборов стенда. При расчёте стадии длительного расхолаживания (на этапе работы ГЕ-2 на последней ступени и далее при работе ГЕ-3) результаты расчётов находятся в пределах колебаний экспериментальных результатов, обусловленных неопределённостями ручного управления экспериментом.

Результаты расчёта по коду КОРСАР/ГП удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными. Для расчётного кода КОРСАР/ГП следует отметить недостаточное, по сравнению с экспериментом, заполнение первого контура на стадии работы ГЕ-1, что связано с повышенным расходом теплоносителя в течь. Однако, это не приводит к оголению активной зоны и повышению температуры оболочек твэл. При расчёте стадии длительного расхолаживания следует отметить хорошее согласие с экспериментальными данными при моделировании кодом КОРСАР/ГП пассивных систем безопасности – СПОТ и ГЕ-2.

Результаты расчётного анализа показали, что код СОКРАТ удовлетворительно описывает основные теплогидравлические процессы, имеющие место в первом и втором контурах стенда ПСБ-ВВЭР, на протяжении рассмотренного (72 ч) аварийного процесса.

Проведённая кроссверификация кода СОКРАТ и аттестованного теплогидравлического кода RELAP5 показала, что код СОКРАТ может использоваться для расчётного обоснования ЗПА на РУ ВВЭР-ТОИ на всех этапах протекания аварийного процесса, включая начальную стадию.

На основании анализа результатов расчётов и полученных экспериментальных данных приводятся рекомендации по корректировке сценария и модернизации стенда для выполнения следующих экспериментов подобного типа.

*Верификация расчётных кодов ТРАП-КС, КОРСАР/ГП и СОКРАТ на основе экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»: рук. И.В. Ёлкин; исполн.: В.И. Мелихов, Ю.В. Парфёнов, С.М. Никонов, Д.И. Дорофеев, А.В. Басов. — Электрогорск, 2012. — 128 с. — Инв. № 424/13.*

### **Исследование гидродинамики воды системы аварийного охлаждения активной зоны в опускном участке реактора ВВЭР**

*Руководитель темы д-р техн. наук В.И. Мелихов;  
отв. исполнитель канд. техн. наук С.М. Никонов;  
исполнители: д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов, канд. техн. наук  
Н.А. Ртищев, А.А. Неровнов, Д.А. Емельянов*

Цель работы состояла в создании базы экспериментальных данных по гидродинамике воды САОЗ и процессам перемешивания в опускном участке АЭС с ВВЭР-1000 при поступлении теплоносителя с пониженной концентрацией борной кислоты из одной из циркуляционных петель, верификации трехмерного CFD кода. В ходе работы проводились экспериментальные исследования процессов перемешивания теплоносителя в опускном участке реактора с использованием солевой и температурной методик на экспериментальной установке кафедры АЭС «НИУ «МЭИ». Полученные экспериментальные данные необходимы для верификации расчетных кодов, используемых для моделирования пространственного изменения параметров теплоносителя (температура, концентрация

борной кислоты) в реакторе ВВЭР. В ходе работы была выполнена верификация трехмерного расчетного CFD кода. Применение верифицированных трехмерных расчетных программных средств позволяет снизить консерватизм расчетов при выполнении анализов безопасности реакторных установок.

*Исследование гидродинамики воды системы аварийного охлаждения активной зоны в опускном участке реактора ВВЭР: отчет о НИР / «НИУ «МЭИ»; рук. В.И. Мелихов; исполн.: С.М. Никонов, О.И. Мелихов, Н.А. Ртищев, А.А. Неровнов, Д.А. Емельянов. — М., 2013. — 129 с. — № 01201270434.*

### **Экспериментальное обоснование на интегральном стенде эффективности систем ГЕ-2 и СПОТ по охлаждению реактора НВ АЭС-2 при запроектных авариях с течью из трубопровода, соединяющего ГЕ с главным циркуляционным контуром**

*Исполнители: канд. техн. наук Н.А. Брус, д-р техн. наук И.В. Ёлкин, канд. техн. наук С.М. Никонов, инженер А.В. Басов*

Цель работы – экспериментальное исследование на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР эффективности совместной работы систем ГЕ-1, ГЕ-2 и СПОТ в условиях запроектной аварии с течью из трубопровода, соединяющего ГЕ со сборной камерой реактора.

Представлены результаты расчёта для НВ АЭС-2 (на основе сценария эксперимента) и результаты эксперимента по моделированию аварии: «Малая» течь 0,58% ( $Dy=65$  мм) из трубопровода, соединяющего ГЕ-1 с СКР.

Отмечается, что результаты расчёта, выполненного для прототипа (НВ АЭС-2) позволили получить предварительную информацию о поведении параметров в подобной аварии. Расчёт выполнен с использованием компьютерного вычислительного комплекса RELAP5/АНГАР.

Результаты выполненного на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР эксперимента с моделированием аварии: «Малая» течь 0,58% из трубопровода системы САОЗ (трубопровод подсоединён к СКР) при наложении потери всех источников переменного тока и совместной работе пассивных систем безопасности показали:

- в результате совместной работы пассивных систем – ГЕ-1, ГЕ-2, и СПОТ температура поверхности имитаторов твэл поддерживается на безопасном уровне в течение всего периода совместной работы пассивных систем;
- в условиях выполненного эксперимента неконденсирующиеся газы не оказали заметного влияния на конденсационную мощность парогенераторов;
- в эксперименте отравление парогенераторов, т.е. уменьшение их конденсационной мощности, не отмечено;
- эффективность сдувки парогазовой смеси через коллектора ПГ (с использованием системы аварийного газоудаления).

Экспериментальные результаты, полученные на стенде ПСБ-ВВЭР, показывают также эффективность работы пассивных систем безопасности, предусмотренных в НВ АЭС-2 с точки зрения выполнения критических функций безопасности, а именно поддержание температуры поверхности твэл на безопасном уровне.

Подчёркивается, что для проектов, в которых планируется использовать систему ГЕ-3 (дополнительно к существующим системам) и довести время поддержания температуры поверхности твэл на безопасном уровне в течение 72 часов, необходимо выполнение экспериментальных исследований.

Полученные экспериментальные результаты показали:

- эффективность новых пассивных систем безопасности;
- эффективность сдувки парогазовой смеси через коллектора ПГ (с использованием системы аварийного газоудаления).

*Экспериментальное обоснование на интегральном стенде эффективности систем ГЕ-2 и СПОТ по охлаждению реактора НВ АЭС-2 при запроектных авариях с течью из трубопровода, соединяющего ГЕ с главным циркуляционным контуром: отчет о НИР / АО «ЭНИЦ»; исполн.: Н.А. Брус, И.В. Ёлкин, С.М. Никонов, А.В. Басов. — Электрогорск, 2015. — 163 с. — Инв. № 477/15.*

### **Разработка технического задания на проведение ресурсных испытаний водоструйного насоса и выполнение расчетного анализа гидродинамических процессов в проточном тракте эжектора**

*Руководитель работы д-р техн. наук В.И. Мелихов; исполнители: канд. техн. наук С.М. Никонов, д-р физ.-мат. наук С.Е. Якуш, канд. техн. наук А.А. Неровнов, Н.А. Ртищев, инженер А.Ш. Исхаков*

Объектом исследования является водоструйный насос (эжектор) системы аварийного и планового расхолаживания первого контура и охлаждения бассейна выдержки энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2, который будет установлен на полномасштабном стенде КЦ АО «ЭНИЦ» для проведения ресурсных испытаний.

Описаны работы:

- по разработке математической модели усовершенствованной конструкции эжектора для CFD кода;
- по анализу материалов Люблянского турбоинститута по испытаниям на моделях 1:2 и 1:4;
- по анализу результатов натурных испытаний агрегата «насос-эжектор», выполненных на энергоблоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 в 2015 году;
- по определению расчетным путем области проточной части эжектора, в которой реализуется режим развитой кавитации.

Кроме того, представлено разработанное техническое задание на проведение ресурсных испытаний эжектора на полномасштабном водоструйном насосе.

*Разработка технического задания на проведение ресурсных испытаний водоструйного насоса и выполнение расчетного анализа гидродинамических процессов*

*в проточном тракте эжектора: отчет о НИР / АО «ЭНИЦ»; рук. В.И. Мелихов; исполн.: С.М. Никонов, С.Е. Якуш, А.А. Неровнов и др. — Электргорск, 2016 — 93 с.— инв. № 489/16.*

## Работы применительно к РБМК

**Разработка сценариев, программ и методик предстоящих экспериментов (предложенные программы и методики должны обеспечить получение экспериментальных точек в рабочей области режимных параметров РБМК-1000). Разработка алгоритмов работы оборудования стенда для реализации предложенных сценариев экспериментов. Выполнение необходимых доработок и усовершенствований в контуре циркуляции стенда**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;  
исполнители: инженеры К.В. Соколов, С.С. Сергеева*

Для проведения исследований по оценке влияния величины внутреннего диаметра ТК РБМК на условия возникновения кризиса теплообмена в рабочем диапазоне режимных параметров на стенде ПСБ РБМК проработана соответствующая методика предстоящих экспериментов. В работе описаны два этапа предстоящих экспериментальных исследований:

1) Проведение экспериментов по определению условий возникновения кризиса теплообмена в ТК с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), при соосном и эксцентричном расположении ТВС и ступенчатым обогревом имитаторов ТВЭЛ ( $Kz = 1,3$ ,  $q_{\max} = 0,9$  МВт/м<sup>2</sup>). Оценка влияния эксцентриситета на условия возникновения кризиса теплообмена.

2) Проведение экспериментов по определению условий возникновения кризиса теплообмена в полномасштабной модели ТК РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), при соосном и эксцентричном расположении ТВС и ступенчатым обогревом имитаторов ТВЭЛ с технически максимально возможным  $Kz$  и  $q_{\max} = 1,5$  МВт/м<sup>2</sup>.

Отмечается, что первый этап исследований может быть выполнен с использованием существующей модели ТВС, а для выполнения второго этапа должна быть изготовлена новая модель ТВС. Обоснована техническая возможность изготовления таких элементов.

Представлены результаты выполненных для заявленных экспериментальных исследований претестовых расчётов возможных кризисных состояний с использованием кода RELAP5/MOD3.2. Показано, что возможности стенда ПСБ РБМК позволяют обеспечить требуемые граничные условия для достижения различных кризисных состояний.

*Разработка сценариев, программ и методик предстоящих экспериментов (предложенные программы и методики должны обеспечить получение экспериментальных точек в рабочей области режимных параметров РБМК-1000). Разработка ал-*

*горитмов работы оборудования стенда для реализации предложенных сценариев экспериментов. Выполнение необходимых доработок и усовершенствований в контуре циркуляции стенда: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: К.В. Соколов, С.С. Сергеева. — Электрогорск, 2011. — 199 с. — Инв. №384/11.*

### **Расчётное обоснование экспериментальных исследований последствий заклинивания ТСТ графитовой колонны РБМК на полномасштабном стенде ТКР**

*Руководитель работы канд. физ-мат. наук Н.Ю. Медведева; исполнители: канд. техн. наук В.Н. Жилко, инженеры О.Б. Хабаров, П.С. Дьячков; соисполнитель от ИЯР НИЦ КИ канд. техн. наук Н.В. Ткачёв*

В работе представлены результаты расчётного обоснования методики выполнения экспериментальных исследований на полномасштабном стенде ТКР, необходимые для моделирования развития ситуации контактного взаимодействия труб ТСТ после расстыковки в холодном состоянии и обратной состыковки при температурном увеличении длины колонны.

При этом рассмотрены следующие вопросы:

- методика учёта в экспериментах различных сценариев развития контактного взаимодействия труб ТСТ при температурном увеличении длины колонны после расстыковки в холодном состоянии;
- методика и расчётное обоснование определения в экспериментах количественных критериев положения конструктивных элементов колонны с расстыкованным ТСТ во время разогрева колонны, при которых состыковка ТСТ произойдёт или не произойдёт (для первой очереди Курской АЭС и Ленинградской АЭС);
- методика и расчётное обоснование моделирования в эксперименте изгибной формы, которую примет колонна после заклинивания ТСТ при разогреве, с учётом взаимодействия с соседними колоннами;
- методика расчётно-экспериментального моделирования влияния факторов формоизменения стареющей кладки на процесс потери устойчивости колонны с учётом статических и динамических эффектов, возникающих при потере устойчивости колонны;
- результаты расчётной оценки величины поперечной нагрузки на аварийную колонну со стороны соседних колонн, при которой возможна смена формы равновесия аварийной колонны.

Отмечается, что для устранения неопределённостей в расчётах необходима экспериментальная проверка данных для расчёта и верификация компьютерных кодов на стенде ТКР.

*Расчётное обоснование экспериментальных исследований последствий заклинивания ТСТ графитовой колонны РБМК на полномасштабном стенде ТКР: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: В.Н. Жилко, О.Б. Хабаров, П.С. Дьячков, Н.В. Ткачёв. — Электрогорск, 2011. — 93 с. — Инв. № 380/11.*

## **Экспериментальные исследования жёсткостных и динамических характеристик (собственные частоты, декременты колебаний) ячеек ТК и КСУЗ в исходном состоянии ГК**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;*

*исполнители: канд. техн. наук В.Н. Жилко, инженеры А.В. Столпник, А.В. Басов*

Объектом исследования является полномасштабный макет 5×5 колонн кладки РБМК на стенде ТКР в ОАО «ЭНИЦ».

Цель работы – выполнение экспериментов по исследованию жёсткостных и динамических характеристик полномасштабного макета 5×5 колонн кладки РБМК с целыми графитовыми блоками.

Отмечается, что полученные экспериментальные данные необходимы для сравнения с данными по исследованию жёсткостных и динамических характеристик ячеек ТК для варианта ГК с геометрией после восстановления работоспособности, т.е. для оценки влияния формоизменения ГК на жёсткостные и динамические характеристики ячеек ТК.

Приведены результаты исследования жёсткостных и динамических характеристик полномасштабного макета 5×5 колонн кладки РБМК с целыми графитовыми блоками на стенде ТКР.

*Экспериментальные исследования жёсткостных и динамических характеристик (собственные частоты, декременты колебаний) ячеек ТК и КСУЗ в исходном состоянии ГК: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: В.Н. Жилко, А.В. Столпник, А.В. Басов. — Электрогорск, 2012. — 87 с. — Инв. № 419/12.*

## **Разработка и изготовление модели ТВС с увеличенной плотностью теплового потока ( $Q_{\max}$ ) в верхней части зоны тепловыделения. Наладка оборудования и систем стенда ПСБ РБМК под предстоящие эксперименты**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;*

*исполнители: инженеры А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева, Л.М. Жура*

Объектом исследования являются модели топливного канала РБМК-1000, поочерёдно устанавливаемые на крупномасштабный теплогидравлический стенд безопасности РБМК (ПСБ РБМК).

Цель работы – выполнение экспериментов по исследованию условий возникновения кризиса теплообмена в ТК РБМК-1000 с различными отклонениями от номинальных геометрических размеров; выявление влияния отклонений от номинальных геометрических размеров ТК на условия возникновения кризиса теплообмена.

Описаны конструкция, а также выполненный комплекс мероприятий по разработке и изготовлению модели ТВС с увеличенной плотностью теплового потока в верхней части зоны тепловыделения ( $q_{\max} = 1,3 \text{ МВт/м}^2$ ). Коэффициент неравномерности тепловыделения по длине имитаторов ТВЭЛ данной модели  $K_z = 1,71$ .

Отмечается, что предварительный расчётный анализ, выполненный теплогидравлическим кодом RELAP5/MOD3.2, показал возможность выполнения с использованием вновь созданной модели ТВС при существующих ограничениях мощности на стенде ПСБ РБМК ( $N \leq 4,0$  МВт) экспериментальных исследований по условиям возникновения кризиса теплообмена в ТК РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм) в заданном диапазоне температур (200–270 °С) и массовых расходов (3–8 кг/с).

*Разработка и изготовление модели ТВС с увеличенной плотностью теплового потока ( $Q_{\max}$ ) в верхней части зоны тепловыделения. Наладка оборудования и систем стенда ПСБ РБМК под предстоящие эксперименты: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева, Л.М. Жура. — Электрогорск, 2012. — 74 с. — Инв. № 408/12.*

**Проведение экспериментов по определению условий возникновения кризиса теплообмена в полномасштабной модели ТК РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), при соосном и эксцентричном расположении ТВС и ступенчатом обогревом имитаторов твэл с технически максимально возможным  $k_z$  и  $q_{\max}$**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус; исполнители: инженеры А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева, Л.М. Жура*

Объектом исследования являются модели топливного канала РБМК-1000, поочередно устанавливаемые на крупномасштабный теплогидравлический стенд безопасности РБМК (ПСБ РБМК).

Отмечается, что для обоснования теплотехнической надёжности ТВС РБМК-1000 (запаса до кризиса теплообмена) при увеличенном диаметре ТК с учётом искривления в дополнительный срок эксплуатации (ДСЭ) были проведены следующие эксперименты по определению условий возникновения кризиса теплообмена:

Экспериментальные исследования условий возникновения кризиса теплообмена в ТК с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), при эксцентричном расположении ТВС в канале (эксцентриситет 2,7 мм) и ступенчатом обогреве имитаторов твэл ( $k_z = 1,3$ ;  $q_{\max} = 0,9$  МВт/м<sup>2</sup>);

Экспериментальные исследования условий возникновения кризиса теплообмена в ТК с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), при эксцентричном расположении ТВС в канале (эксцентриситет 2,7 мм), ступенчатом обогреве имитаторов твэл ( $k_z = 1,3$ ;  $q_{\max} = 0,9$  МВт/м<sup>2</sup>) и малыми зазорами между имитаторами твэл и стенкой канала (0,7–0,8 мм).

Отмечается, что решение о проведении экспериментов на рабочем участке с малыми зазорами между имитаторами твэл и стенкой канала (вплоть до касания) обусловлено тем, что организация прогиба (искривления) экспериментального канала в предполагаемом сечении возникновения кризиса теплоотдачи технически затруднена. В связи с этим и учитывая,

что основным фактором влияния прогиба ТК на условия возникновения кризиса теплообмена, является уменьшение зазора между оболочками твэлов и канальной трубой, было решено провести эксперименты при минимальных зазорах между теплогидравлической моделью ТВС и каналом (для канала диаметром 84 мм) на стенде ПСБ РБМК. С этой целью была проведена модернизация рабочего участка стенда, обеспечившая малые зазоры (вплоть до касания) между имитаторами твэл и изоляционными втулками, формирующими канал, на одном шаге между решётками. Таким образом, экспериментально была получена предельная оценка влияния изменения формы ТК на условия возникновения кризиса теплообмена. В выполненных экспериментах зазор между имитаторами твэл и стенкой канала составлял 0,7–0,8 мм.

Представлены полученные в ходе экспериментов характерные для кризиса теплоотдачи зависимости критической тепловой мощности от расхода и критического теплового потока от массового паросодержания. Показано, что снижение зазора между имитаторами твэл и омываемой теплоносителем стенкой канала до 0,7–0,8 мм (имитация изгиба ТК) приводит к некоторому снижению запаса по кризису теплоотдачи.

Отмечается также, что полученные экспериментальные данные включены в библиотеку теплофизических баз данных ОАО «НИКИЭТ» и используются для обоснования теплотехнической надёжности ТВС (запаса до кризиса теплообмена) при увеличенном диаметре ТК с учётом искривления в ДСЭ. В настоящее время с использованием этих данных начаты работы по проверке и корректировке расчётных зависимостей, используемых для определения момента возникновения кризиса теплоотдачи, а также для верификации расчётных кодов (программных средств).

*Проведение экспериментов по определению условий возникновения кризиса теплообмена в полномасштабной модели ТК РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), при соосном и эксцентричном расположении ТВС и ступенчатым обогревом имитаторов твэл с технически максимально возможным  $k_z$  и  $q_{max}$ : отчет о НИР/ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева, Л.М. Жура. — Электрогорск, 2012. — 281 с. — Инв. № 418/12.*

### **Расчетно-экспериментальные исследования последствий заклинивания ТСТ графитовой колонны РБМК на полномасштабном стенде ТКР**

*Руководитель работ канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева; исполнители: инженер П.С. Дьячков, от НИЦ «Курчатовский институт» — канд. техн. наук В.В. Ткачёв, от ОАО «НИКИЭТ» — инженер В.Д. Болдин*

Представлены результаты экспериментов на стенде ТКР, их обработка, анализ и применение для верификации и модернизации расчётных кодов на примере кода FEMGR. Работа выполнена в соответствии с «Программой и методикой экспериментальных исследований последствий заклинивания

ТСТ графитовой колонны РБМК на стенде ТКР», ЭНИЦ, Электрогорск, инв. № 377.10, 2010. Отмечается, что результаты экспериментов, полученные на стенде ТКР, легли в основу прогноза деформирования графитовых колонн, а также для пополнения базы данных о поведении графитовой кладки РБМК. Эти результаты также легли в основу верификации и модернизации кода FEMGR, использованы для получения корреляционных зависимостей. Описано использование полученных результатов экспериментов для прогноза поведения графитовой вкладки. Приводятся рекомендации по эксплуатации энергоблоков РБМК на завершающем этапе работы, основные на результатах выполнения Программы.

*Расчетно-экспериментальные исследования последствий заклинивания ТСТ графитовой колонны РБМК на полномасштабном стенде ТКР: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: П.С. Дьячков, В.В. Ткачëв, В.Д. Болдин. — Электрогорск, 2012. — 158 с. — Инв.№ 414.12.*

### **Определение динамических характеристик и статической жёсткости отремонтированных графитовых колонн на стенде ТКР**

*Руководитель работ канд. физ-мат. наук Н.Ю. Медведева;  
исполнители: канд. техн. наук В.Н. Жилко, инженер П.С. Дьячков*

В работе отмечается, что в настоящий период времени геометрия активной зоны реактора РБМК претерпевает существенные формоизменения в результате продольного растрескивания графитовых блоков из-за возникающих в них радиационно-термических напряжений и последующего раскрытия продольных трещин.

Искривления графитовых колонн такого типа, а также разрезка графитовых блоков на фрагменты при проведении ремонтных работ приводят к изменению динамических характеристик графитовой кладки в целом, что следует учитывать при расчётном обосновании её сейсмостойкости.

При этом такой параметр, как демпфирование, может быть получен исключительно экспериментальным путём. В этой связи, в целях верификации расчётных кодов FEMGR («РНЦ КИ») и программного конечно-элементного комплекса ЛЭГАК-ДФ («ВНИИЭФ»), для обоснования сейсмостойкости формоизменённой графитовой кладки были запланированы экспериментальные исследования динамических характеристик различных конфигураций графитовых колонн в составе рабочего участка стенда ТКР методом вибрационного нагружения.

С этой целью проведена доработка рабочего участка стенда ТКР для проведения исследований по определению динамических характеристик графитовой кладки методом вибрационного нагружения.

Представлены результаты проведенных испытаний по определению жёсткостных характеристик пакета графитовой кладки, состоящего из двадцати пяти, девяти и шести колонн с разрезанными и с цельными блоками и полученные зависимости силы, прилагаемой для изгиба ГК и перемещения

от времени, а также зависимости изгибной жёсткости ГК от перемещения и прилагаемой силы.

*Разделы в итоговый отчёт по определению динамических характеристик и статической жёсткости отремонтированных графитовых колонн на стенде ТКР: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.Ю. Медведева; исполн.: В.Н. Жилко, П.С. Дьячков. — Электрогорск, 2013. — 41 с. — Инв. № 111.1.839.*

### **Выполнение комплекса работ по подготовке и проведению на стенде полномасштабной графитовой кладки ТКР завершающего этапа испытаний устройств и оснастки для восстановления ресурсных характеристик элементов реакторной установки**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;*

*исполнители: инженер А.В. Столпник, канд. техн. наук В.Н. Жилко, инженер Л.М. Жура*

В работе отмечается, что объектом исследования являются устройства и оснастка для восстановления ресурсных характеристик элементов реакторной установки РБМК-1000.

Цель работы — подготовка испытательных стендов и выполнение комплекса работ по обеспечению и сопровождению испытаний вновь разработанных устройств и оснастки для восстановления ресурсных характеристик элементов реакторной установки РБМК-1000.

Для восстановления ресурсных характеристик энергоблоков РБМК-1000 силами ОАО «НИКИМТ-Атомстрой», ЗАО «Диаконт» и ООО «Пролог» был разработан и изготовлен комплект специальных устройств и оснастки. Для стендовых испытаний опытных образцов данных устройств и оснастки в ОАО «ЭНИЦ» на базе стенда ТКР были подготовлены следующие экспериментальные участки:

- фрагмент графитовой кладки, состоящий из двадцати пяти графитовых колонн с ТК;
- траверса — кантователь с раскреплённой на ней полномасштабной графитовой колонной РБМК-1000.

Отработку технологии восстановительных работ было решено выполнить в ходе восстановления ресурсных характеристик энергоблока № 1 Ленинградской АЭС.

На подготовленных ОАО «ЭНИЦ» экспериментальных участках в присутствии приёмочной комиссии были проведены предварительные и приёмочные испытания вновь разработанного оборудования.

В результате проведенных работ для всех основных операций, предусмотренных технологическим процессом восстановления ресурсных характеристик энергоблоков РБМК-1000, были испытаны и рекомендованы для дальнейшего использования на энергоблоке № 1 ЛАЭС вновь разработанные образцы устройств и оснастки.

Описаны испытания вновь разработанных устройств и оснастки для восстановления ресурсных характеристик элементов реакторной установ-

ки РБМК-1000 и результаты проведённых на стенде ТКР в ОАО «ЭНИЦ» стендовых испытаний данных устройств и оснастки.

*Выполнение комплекса работ по подготовке и проведению на стенде полномасштабной графитовой кладки ТКР завершающего этапа испытаний устройств и оснастки для восстановления ресурсных характеристик элементов реакторной установки: отчет о НИР/ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: А.В. Столпник, В.Н. Жилко, Л.М. Жура. — Электрогорск, 2013. — 281 с. — Инв. № 425/13.*

**Экспериментальные исследования влияния формоизменения ГК на жёсткостные и динамические характеристики (собственные частоты, декременты колебаний) ячеек ТК и КСУЗ для варианта ГК с геометрией после восстановления работоспособности**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;  
исполнители: канд. физ-мат. наук Н.Ю. Медведева, канд. техн. наук  
В.Н. Жилко, инженеры А.В. Столпник, П.С. Дьячков*

В работе отмечается, что объектом исследования является полномасштабный макет (5×5 колонн) кладки РБМК-1000, расположенный в защитном кожухе стенда ТКР (ОАО «ЭНИЦ»). На графитовых блоках данной кладки имитированы отклонения и повреждения, имеющие место на реальных энергоблоках в ходе их длительной эксплуатации. Кроме того, с вышеуказанными блоками проведены операции, предусмотренные работами по управлению ресурсными характеристиками реакторных установок РБМК-1000.

Цель работы — проведение статических и динамических испытаний полномасштабного макета кладки РБМК-1000 для получения экспериментальных данных как для непосредственного анализа влияния восстановительных работ на реакторе на сейсмическую устойчивость, так и для дополнительной верификации кодов, задействованных при обосновании сейсмостойкости энергоблоков РБМК на завершающем этапе эксплуатации.

Представлены и проанализированы основные результаты экспериментальных исследований влияния формоизменения графитовых колонн (ГК) РБМК-1000 на жёсткостные и динамические характеристики ячеек ТК и КСУЗ для исходного состояния и варианта ГК с геометрией после восстановления работоспособности, показавшие что:

1) Жёсткости сборок колонн, составленных из целых и разрезанных графитовых блоков, практически не зависят от степени фрагментации графитовой кладки. Они определяются жёсткостью труб каналов и трением между графитовыми блоками соседних колонн.

2) Разрез графитовых блоков на две половины привёл к следующим изменениям динамических характеристик:

- незначительному (на 0,2 Гц) снижению первой собственной частоты ГК;
- увеличению относительного демпфирования на 4–8%;

- увеличению разброса значений относительного демпфирования в экспериментах с одинаковой конфигурацией ГК.

3) Дополнительный разрез графитовых блоков трёх колонн на четыре части практически не изменил динамические характеристики ГК.

*Экспериментальные исследования влияния формоизменения ГК на жёсткостные и динамические характеристики (собственные частоты, декременты колебаний) ячеек ТК и КСУЗ для варианта ГК с геометрией после восстановления работоспособности: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: Н.Ю. Медведева, В.Н. Жилко, А.В. Столпник, П.С. Дьячков. — Электрогорск, 2013. — 183 с. — Инв. № 432/13.*

### **Проведение экспериментов, необходимых для завершения экспериментальных исследований кризиса теплообмена в топливных каналах РБМК-1000 изменённой формы. Полная база экспериментальных данных по всем исследованиям кризиса теплообмена для АЭС с РБМК-1000. Составление корреляционных зависимостей по возникновению кризиса теплообмена**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус; исполнители: инженеры А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева, Л.М. Жура*

В работе отмечается, что объектом исследования являются модели топливного канала РБМК-1000, поочерёдно устанавливаемые на крупномасштабный теплогидравлический стенд безопасности РБМК (ПСБ РБМК).

Цель работы – выполнение экспериментов по исследованию условий возникновения кризиса теплообмена в ТК РБМК-1000 с различными отклонениями от номинальных геометрических размеров; выявление влияния отклонений от номинальных геометрических размеров ТК на условия возникновения кризиса теплообмена.

Описаны и проанализированы результаты экспериментов по определению условий возникновения кризиса теплообмена в полномасштабной модели ТК РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), при соосном и эксцентричном расположении ТВС и ступенчатом обогреве имитаторов твэл, с имитацией и без имитации прогиба канала. Приведено сравнение вновь полученных экспериментальных данных с результатами ранее выполненных исследований.

Отмечается также, что в ходе экспериментов были получены характерные для кризиса теплоотдачи зависимости критической тепловой мощности от расхода и критического теплового потока от массового паросодержания и этим подтверждается качество полученных экспериментальных результатов. Последние включены в Библиотеку теплофизических баз данных ОАО «НИКИЭТ» и были использованы для верификации расчётного кода ПУЧОК БМ ДФ, по которому проводится обоснование теплотехнической

надёжности ТВС (запаса до кризиса теплообмена) при увеличенном диаметре ТК с учётом искривления в дополнительном сроке эксплуатации.

*Проведение экспериментов необходимых для завершения экспериментальных исследований кризиса теплообмена в топливных каналах РБМК-1000 изменённой формы. Полная база экспериментальных данных по всем исследованиям кризиса теплообмена для АЭС с РБМК-1000. Составление корреляционных зависимостей по возникновению кризиса теплообмена: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева, Л.М. Жура. — Электрогорск, 2013. — 657 с. — Инв. № 431.1/13.*

### **Расчетно-экспериментальные исследования аварий с осушением групп топливных каналов РБМК на стенде ТКР-Ф**

*Руководитель работы канд. физ.-мат. наук Н.Ю. Медведева; исполнители: канд. техн. наук В.Н. Жилко, инженеры Е.Е. Дементьев, П.С. Дьячков, от НИЦ КИ — инженер Д.А. Михайлов, канд. техн. наук В.В. Ткачев, инженер М.Ю. Шемонов, от НИКИЭТ — инженер А.Ю. Мамонтов*

Представлены результаты экспериментов на стенде ТКР-Ф (стенд ТКР-фрагмент) в ЭНИЦ, их обработка, анализ и применение для верификации расчетных средств. Работа выполнена в соответствии с «Программой и методикой экспериментальных исследований аварий с осушением групп топливных каналов РБМК на комплексе стендов ТКР».

Отмечается, что стенд ТКР создан для экспериментального изучения процесса деформирования графитовых колонн РБМК и полномасштабного моделирования нештатных ситуаций, возникающих при эксплуатации кладки, а стенд ТКР-Ф — фрагмент стенда ТКР — оборудован для экспериментального исследования поведения элементов активной зоны РБМК при авариях с осушением групп топливных каналов РБМК.

Представлены методики и расчетные коды, использованные для обработки экспериментальных данных.

Отмечается, что в рамках применения расчетных кодов получены результаты:

- По коду RTUBL. Результаты расчетов условий появления свищей в трубе канала по RTUBL подтверждаются экспериментальными данными. Корректировка кода RTUBL не требуется.
- По коду PCLAD. Результаты расчетов кодом PCLAD момента времени образования свища (разрыва) оболочек твэлов подтверждаются экспериментальными данными. По данным экспериментов была выполнена корректировка и модернизация кода для учета скачкообразного увеличения диаметра оболочек при раскрытии трещин в момент разрыва.

Для уточнения прочностных характеристик и верификации расчетов деформирования и обрыва стержня каркаса определен деформационный критерий обрыва каркаса в статистической и детерминированной постановках.

*Расчетно-экспериментальные исследования аварий с осушением групп топливных каналов РБМК на стенде ТКР-Ф: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.Ю.*

*Медведева; исполн.: В.Н. Жилко, Е.Е. Дементьев, П.С. Дьячков, Д.А. Михайлов, В.В. Ткачев, М.Ю. Шемонов, А.Ю. Мамонтов. — Электрогорск, 2014. — 234 с. — Инв. № 459/14.*

**Проведение второго этапа экспериментальных исследований кризиса теплообмена в топливных каналах РБМК-1000 измененной формы. Анализ полученных результатов. Подготовка базы экспериментальных данных по всем проведенным исследованиям кризиса теплообмена. Выпуск итогового отчета по результатам экспериментальных исследований**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;*

*исполнители: инженеры А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева*

Объектом исследования является модель топливного канала РБМК-1000, установленная на крупномасштабный теплогидравлический стенд безопасности РБМК (ПСБ РБМК).

Работа выполняется в целях получения максимально возможного объема данных, необходимых для верификации расчетных зависимостей по определению условий возникновения кризиса теплообмена, используемых в коде ПУЧОК БМ-ДФ.

В настоящей работе описаны дополнительные эксперименты по определению условий возникновения кризиса теплообмена в полномасштабной модели ТК РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), при эксцентричном расположении ТВС и ступенчатом обогреве имитаторов твэл. В экспериментах задействованы две модели ТВС со следующими характеристиками:

- модель ТВС с коэффициентом неравномерности тепловыделения по длине имитатора твэл  $K_z = 1,3$ , максимальной плотностью теплового потока в верхней части имитаторов  $q_{\max} = 0,9$  МВт/м<sup>2</sup>;
- модель ТВС с коэффициентом неравномерности тепловыделения по длине имитатора твэл  $K_z = 1,7$ , максимальной плотностью теплового потока в верхней части имитаторов  $q_{\max} = 1,3$  МВт/м<sup>2</sup>.

Эксперименты проводились в целях пополнения существующей базы экспериментальных данных. Всего было получено 97 новых экспериментальных точек, которые дополнили существующую базу экспериментальных данных.

Отмечается, что в ходе экспериментов были получены характерные для кризиса теплоотдачи зависимости критической тепловой мощности от расхода и критического теплового потока от массового паросодержания. Вновь полученные экспериментальные точки хорошо согласуются с ранее полученными результатами.

*Проведение второго этапа экспериментальных исследований кризиса теплообмена в топливных каналах РБМК-1000 измененной формы. Анализ полученных результатов. Подготовка базы экспериментальных данных по всем проведенным исследованиям*

*кризиса теплообмена. Выпуск итогового отчета по результатам экспериментальных исследований: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева. — Электрогорск, 2014. — 418 с. — Инв. № 454/14 (часть I), инв. № 455/14 (часть II), инв. № 454/14 (часть III).*

**Выпуск технических требований к рабочему участку стенда ПСБ РБМК. Разработка программы и методики испытаний. Выпуск конструкторской документации для доработки рабочего участка стенда ПСБ РБМК и изготовления модели ТВС с неравномерным по высоте тепловыделением. Закупка необходимых для дальнейших работ материалов**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;  
исполнители: инженеры А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева*

Объектом исследования является модель топливного канала РБМК-1000, установленная на крупномасштабный теплогидравлический стенд безопасности ПСБ РБМК АО «ЭНИЦ».

Работа выполняется в целях получения максимально возможного объёма экспериментальных данных по условиям возникновения кризиса теплообмена в ТК РБМК-1000 изменённой геометрии, необходимых для дополнительной верификации кодов SC1 (разработки НИЦ КИ) и ПУЧОК БМ-ДФ (разработки АО «НИКИЭТ»).

Представлено описание разработки конструкции рабочего участка стенда ПСБ РБМК, моделирующего ТК РБМК-1000 с неравномерной по высоте геометрией и неравномерным по высоте ТВС тепловыделением. Представлены также программа и методика испытаний.

*Выпуск технических требований к рабочему участку стенда ПСБ РБМК. Разработка программы и методики испытаний. Выпуск конструкторской документации для доработки рабочего участка стенда ПСБ РБМК и изготовления модели ТВС с неравномерным по высоте тепловыделением. Закупка необходимых для дальнейших работ материалов: отчет о НИР / АО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева. — Электрогорск, 2016. — 197 с. — Инв. № 481/16.*

**Проведение экспериментальных исследований условий возникновения кризиса теплообмена в топливных каналах РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм) на ранее изготовленном рабочем участке с соосным расположением моделей ТВС**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус;  
исполнители: инженеры А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева*

Отмечается, что цель работы — получение максимально возможного объёма экспериментальных данных по условиям возникновения кризиса теплообмена в ТК РБМК-1000 изменённой геометрии, необходимых для дополнительной верификации кодов SC1 (разработка НИЦ КИ) и ПУЧОК БМ-ДФ (разработка АО «НИКИЭТ»).

Представлены данные, полученные в экспериментах по определению условий возникновения кризиса теплообмена в полномасштабной модели ТК РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), при соосном расположении ТВС и ступенчатом обогреве имитаторов твэл. В экспериментах задействована модель ТВС, в которой коэффициент неравномерности тепловыделения по длине имитатора твэл  $K_z = 1,7$ , а максимальная плотность теплового потока в верхней части имитаторов  $q_{\max} = 1,3$  МВт/м<sup>2</sup>.

*Проведение экспериментальных исследований условий возникновения кризиса теплообмена в топливных каналах РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм) на ранее изготовленном рабочем участке с соосным расположением моделей ТВС: отчет о НИР / АО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева. — Электрогорск, 2016. — 84 с. — Инв. № 482/16.*

### **Проведение первого этапа экспериментальных исследований условий возникновения кризиса теплообмена в топливных каналах РБМК-1000 переменной геометрии при равномерном и неравномерном по высоте обогреве моделей ТВС. Анализ результатов**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус; исполнители: инженеры А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева*

Объектом исследования является модель топливного канала РБМК-1000, установленная на крупномасштабный теплогидравлический стенд безопасности РБМК (ПСБ РБМК).

Отмечается, что работа выполняется в целях получения максимально возможного объема экспериментальных данных по условиям возникновения кризиса теплообмена в ТК РБМК-1000 измененной геометрии, необходимых для дополнительной верификации кодов S1 (разработки НИЦ КИ) и ПУЧОК БМ-ДФ (разработки АО «НИКИЭТ»).

Представлены результаты экспериментов по определению условий возникновения кризиса теплообмена в полномасштабной модели ТК РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), при соосном расположении ТВС и равномерном по высоте тепловыделении имитаторов твэл. В ходе экспериментов получены характерные для кризиса теплоотдачи зависимости критической тепловой мощности от расхода и критического теплового потока от массового паросодержания.

*Проведение первого этапа экспериментальных исследований условий возникновения кризиса теплообмена в топливных каналах РБМК-1000 переменной геометрии при равномерном и неравномерном по высоте обогреве моделей ТВС. Анализ результатов: отчет о НИР / АО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева — Электрогорск, 2017 — 126 с. — инв. № 487/17.*

**Проведение первого этапа экспериментальных исследований условий возникновения кризиса теплообмена в топливных каналах РБМК-1000 переменной геометрии при равномерном и неравномерном по высоте обогреве моделей ТВС. Анализ полученных результатов**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус; исполнители: инженеры А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева*

Объектом исследования является модель топливного канала РБМК-1000, установленная на крупномасштабный теплогидравлический стенд безопасности РБМК (ПСБ РБМК).

Отмечается, что работа выполняется в целях получения максимально возможного объема экспериментальных данных по условиям возникновения кризиса теплообмена в ТК РБМК-1000 измененной геометрии, необходимых для дополнительной верификации кодов S1 (разработки НИЦ КИ) и ПУЧОК БМ-ДФ (разработки АО «НИКИЭТ»).

Представлены результаты экспериментов по определению условий возникновения кризиса теплообмена в двух нижеописанных полномасштабных моделях и ТК РБМК-1000:

- модель ТК РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), при соосном расположении ТВС с равномерным обогревом имитаторов твэл;
- модель ТК РБМК-1000 переменной геометрии при соосном расположении ТВС со ступенчатым обогревом имитаторов твэл (коэффициент неравномерности тепловыделения по длине имитатора твэл  $K_z=1,3$ , а максимальная плотность теплового потока в верхней части имитаторов  $q_{\max}=0,9$  МВт/м<sup>2</sup>).

В ходе экспериментов получены характерные для кризиса теплоотдачи зависимости критической тепловой мощности от расхода и критического теплового потока от массового паросодержания.

*Проведение первого этапа экспериментальных исследований условий возникновения кризиса теплообмена в топливных каналах РБМК-1000 переменной геометрии при равномерном и неравномерном по высоте обогреве моделей ТВС. Анализ полученных результатов: отчет о НИР/АО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева – Электрогорск, 2017 – 209 с. – инв. № 496/17.*

**Проведение дополнительных экспериментальных исследований условий возникновения кризиса теплообмена в топливных каналах РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм) на ранее изготовленном рабочем участке с соосным расположением моделей ТВС**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус; исполнители: инженеры А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева*

Объектом исследования является модель топливного канала РБМК-1000, установленная на крупномасштабный теплогидравлический стенд безопасности РБМК (ПСБ РБМК).

Отмечается, что работа выполняется в целях получения максимально возможного объема экспериментальных данных по условиям возникновения кризиса теплообмена в ТК РБМК-1000 измененной геометрии, необходимых для дополнительной верификации кодов SC1 (разработки НИЦ КИ) и ПУЧОК БМ-ДФ (разработки АО «НИКИЭТ»).

Представлены результаты экспериментов по определению условий возникновения кризиса теплообмена в полномасштабной модели ТК РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), при соосном расположении ТВС и ступенчатом по высоте обогреве имитаторов твэл. В экспериментах задействована модель ТВС в которой коэффициент неравномерности тепловыделения по длине имитатора твэл  $K_z = 1,7$ , а максимальная плотность теплового потока в верхней части имитаторов  $q_{\max} = 1,3 \text{ МВт/м}^2$ .

В ходе экспериментов были получены характерные для кризиса теплоотдачи зависимости критической тепловой мощности от расхода и критического теплового потока от массового паросодержания.

*Проведение дополнительных экспериментальных исследований условий возникновения кризиса теплообмена в топливных каналах РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм) на ранее изготовленном рабочем участке с соосным расположением моделей ТВС: отчет о НИР / АО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: А.В. Столтник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева – Электрогорск, 2017 – 132 с. – инв. № 484/17.*

### **Проведение второго этапа экспериментальных исследований условий возникновения кризиса теплообмена в топливных каналах РБМК-1000 переменной геометрии при равномерном и неравномерном по высоте обогреве моделей ТВС. Анализ полученных результатов выпуск итогового отчета по результатам экспериментальных исследований**

*Руководитель работы канд. техн. наук Н.А. Брус; исполнители: инженеры А.В. Столтник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева*

Объектом исследования является модель топливного канала РБМК-1000, установленная на крупномасштабный теплогидравлический стенд безопасности РБМК (ПСБ РБМК).

Отмечается, что работа выполняется в целях получения максимально возможного объема экспериментальных данных по условиям возникновения кризиса теплообмена в ТК РБМК-1000 измененной геометрии, необходимых для дополнительной верификации кодов SC1 (разработки НИЦ КИ) и ПУЧОК БМ-ДФ (разработки АО «НИКИЭТ»).

Представлены результаты экспериментов по определению условий возникновения кризиса теплообмена в нижеописанных полномасштабных моделях и ТК РБМК-1000:

- модель ТК РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), при соосном расположении ТВС и ступенчатом обогреве имита-

торов твэл (коэффициент неравномерности тепловыделения по длине имитатора твэл  $K_z = 1,7$ ; максимальная плотность теплового потока в верхней части имитаторов  $q_{\max} = 1,3$  МВт/м<sup>2</sup>);

- модель ТК РБМК-1000 с увеличенным внутренним диаметром (84 мм), при соосном расположении ТВС с равномерным обогревом имитаторов твэл;
- модель ТК РБМК-1000 переменной геометрии при соосном расположении ТВС со ступенчатым обогревом имитаторов твэл ( $K_z = 1,3$ ;  $q_{\max} = 0,9$  МВт/м<sup>2</sup>);
- модель ТК РБМК-1000 переменной геометрии при соосном расположении ТВС с неравномерным по высоте тепловыделением ( $K_z = 1,4$  с максимумом в средней части).

В ходе экспериментов получены характерные для кризиса теплоотдачи зависимости критической тепловой мощности от расхода и критического теплового потока от массового паросодержания.

*Проведение второго этапа экспериментальных исследований условий возникновения кризиса теплообмена в топливных каналах РБМК-1000 переменной геометрии при равномерном и неравномерном по высоте обогреве моделей ТВС. Анализ полученных результатов выпуск итогового отчета по результатам экспериментальных исследований: отчет о НИР / АО «ЭНИЦ»; рук. Н.А. Брус; исполн.: А.В. Столпник, К.В. Соколов, С.С. Сергеева – Электрогорск, 2017 – 120 с. – инв. № 505/17.*

## Работы исследовательско-поискового характера

### Исследование гидродинамики и теплообмена в кольцевых твэлах для ядерно-энергетических установок нового поколения

*Руководитель темы д-р техн. наук В.Н. Блинков;*

*отв. исполнитель д-р физ.-мат. наук О.И. Мелихов;*

*исполнители: д-р техн. наук В.И. Мелихов, канд. физ.-мат. наук*

*Ю.В. Парфенов*

Цель работы состояла в подготовке аналитического обзора по вопросам гидродинамики и теплообмена в кольцевых твэлах, разработке математической модели, численного метода программного средства для теплогидравлического расчета кольцевых твэлов ядерно-энергетических установок нового поколения. В основе математической модели расчетного программного средства лежат уравнения сохранения массы, импульса и энергии для каждой из рассматриваемых фаз (пар, вода). Твэлы активной зоны описываются введением объемной доли третьей фазы (модель пористой среды) с тепловыделением. На основе анализа литературы был сформирован набор корреляций, наиболее точно описывающий массовое, силовое и тепловое взаимодействие фаз. В качестве численного метода интегрирования был выбран полуявный конечно-разностный метод, обеспечивающий, с одной стороны, достаточную быстроту вычислений, с другой стороны, тре-

букую устойчивость. Этот метод затем был адаптирован к разработанной математической модели. Была разработана матрица валидации, которая устанавливает взаимосвязь явлений, описываемых расчетным кодом, с имеющимися экспериментальными данными. На основе этой матрицы были проведены расчеты для валидации кода, результаты которых оценены методом стохастической аппроксимации.

*Исследование гидродинамики и теплообмена в кольцевых твэлах для ядерно-энергетических установок нового поколения по теме 2230090: отчет о НИР / «НИУ «МЭИ»; рук. В.Н. Блинков; исполн.: О.И. Мелихов, В.И. Мелихов, Ю.В. Парфенов. — М., 2011. — 159 с. — Гос. рег. № 01200960851.*

### **Измерение средних скоростей в ячейках модели тепловыделяющей сборки**

*Руководитель работы д-р техн. наук Э.А. Болтенко;  
исполнители: инженеры А.В. Басов, И.В. Кононенко*

В работе описана экспериментальная установка (стенд ЛИС ВВЭР), конструкция экспериментальных участков, методика измерения расходов воды (средние скорости) в характерных ячейках моделейборок с перспективными дистанционирующими решётками.

Представлены и проанализированы данные применительно к сборкам с перспективными дистанционирующими решётками: дистанционирующая решётка «прогонка» — 37 стержней, дистанционирующая решётка «вихрь» — 19 стержней, штатная дистанционирующая решётка 37 стержней, штатная дистанционирующая решётка — 127 стержней.

Отмечается, что измерения были выполнены методом изокинетического отбора.

*Измерение средних скоростей в ячейках модели тепловыделяющей сборки: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Э.А. Болтенко; исполн.: А.В. Басов, И.В. Кононенко. — Электрогорск, 2013. — 43 с. — Инв. № 430/13.*

### **Аналитический обзор по локальным характеристикам и структуре потока применительно к верификации кода ПУЧОК-БМ-ДФ**

*Руководитель работы д-р техн. наук Э.А. Болтенко;  
исполнитель инженер И.В. Кононенко*

Представлен аналитический обзор работ, в которых приведены экспериментальные данные по интенсивности межъячейкового переноса в моделях тепловыделяющихборок, в том числе и с неравноценными ячейками. Приведены экспериментальные данные по кризису теплоотдачи, полученные на сборках с тепловой и гидродинамической неравномерностью по сечению сборки. Эти данные необходимы для верификации программ поячейкового расчета.

*Аналитический обзор по локальным характеристикам и структуре потока применительно к верификации кода ПУЧОК-БМ-ДФ: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Э.А. Болтенко; исполн. И.В. Кононенко. — Электрогорск, 2014. — 114 с. — Инв. № 149/14.*

## **Проведение экспериментов на стенде ЛИС по определению расходов в гидравлических ячейках на модели 19-стержневой сборки ТК РБМК и обобщение полученных результатов**

*Руководитель работы д-р техн. наук Э.А. Болтенко;*

*исполнители: инженеры И.В. Кононенко, А.В. Басов, канд. техн. наук М.В. Давыдов*

Объектом исследования является модель тепловыделяющей сборки ТК РРБМК. Измерялись расходы воды (средние скорости) в характерных ячейках модели сборки со штатной дистанционирующей решеткой. Измерения выполнены методом изокинетического отбора.

В работе описана экспериментальная установка, конструкция экспериментального участка, методика измерения расходов воды в ячейках модели сборки.

Представлены экспериментальные данные по расходам воды в характерных ячейках сборки.

Предложена методика расчета расходов жидкости и кризиса теплоотдачи на поверхностях твэл в сборках. Методика базируется на известной методике расчета расходов жидкости в пристенных пленках и кризиса теплоотдачи на вогнутых и выпуклых поверхностях твэл (трубы, кольцевые каналы). Представлены расчеты расходов жидкости в ячейках 7-ми стержневой сборки на основе представленной методики. В качестве исходных использовались значения массового паросодержания, полученные экспериментально методом изокинетического отбора.

*Проведение экспериментов на стенде ЛИС по определению расходов в гидравлических ячейках на модели 19-стержневой сборки ТК РБМК и обобщение полученных результатов: отчет о НИР/ОАО «ЭНИЦ»; рук. Э.А. Болтенко; исполн.: И.В. Кононенко, А.В. Басов, М.В. Давыдов. — Электрогорск, 2014. — 46 с. — Инв. № 460/14.*

## **Разработка методики исследования локальных характеристик потока теплоносителя в стержневых сборках, моделирующих ТК РБМК, в условиях обогрева. Разработка КД модели ТВС РБМК-1000 и элементов систем отбора применительно к электрообогреваемому стенду. Изготовление имитаторов твэлов.**

*Руководитель работы д-р техн. наук Э.А. Болтенко; исполнители: д-р техн. наук В.В. Стулов, канд. техн. наук М.В. Давыдов, инженеры А.В. Басов, И.В. Кононенко*

Представлена методика проведения исследований локальных параметров потока в стержневой сборке, моделирующей ТК РБМК в условиях обогрева. Дано краткое описание объекта исследований — модели сборки ТК РБМК. Модель сборки ТК РБМК предназначена для проведения отбора пристенной пленки с корпуса сборки и изокинетического отбора одно- и двухфазной смеси из характерных ячеек сборки. Приведен диапазон режимных параметров, при которых должны быть проведены измерения.

Представлена методика выполнения исследований и обработки данных. Представлено описание конструкции экспериментального участка, пробоотборников, конструкции имитатора твэл.

*Разработка методики исследования локальных характеристик потока теплоносителя в стержневых сборках, моделирующих ТК РБМК, в условиях обогрева. Разработка КД модели ТВС РБМК-1000 и элементов систем отбора применительно к электрообогреваемому стенду. Изготовление имитаторов твэлов: Отчет о НИР/АО «ЭНИЦ»; Рук. Э.А. Болтенко; исполн.: В.В. Стулов, М.В. Давыдов, А.В. Басов, И.В. Кононенко. — Электрогорск, 2016 — 34 С. — инв. № 479/16-1*

## Работы прикладного характера

### **Анализ состояния турбинных и трансформаторных масел на АЭС. Разработка мероприятий по обеспечению качества турбинных и трансформаторных масел требованиям нормативных документов**

*Руководитель работы канд. хим. наук Л.А. Галимова;  
исполнители: д-р техн. наук В.А. Гашенко, канд. хим. наук С.Г. Амбарцумян;  
соисполнители: от ООО «Микронинтер» — инженеры В.В. Мельников,  
Д.В. Курганов, Д.В. Шуварин*

Представлены результаты:

- анализа требований основных руководящих документов, отраслевых стандартов и тематических отечественных публикаций по трансформаторным и турбинным маслам, применяемым на АЭС;
- анализа состояния турбинных и трансформаторных масел в оборудовании АЭС, который проводился на основании данных производственных цехов АЭС о состоянии качества масел при поставке, хранении, применении в оборудовании и при очистке масла;
- анализа схем снабжения маслами энергетического оборудования, порядка применения маслоочистительного оборудования, комплектности лабораторных приборов для анализа масла, порядка организации контроля качества масла.

По результатам анализа данных, полученных при обследовании состояния эксплуатации, организации контроля качества энергетических масел на АЭС, представлены Технические предложения, разработанные по мероприятиям, направленным на обеспечение и поддержание качества, совершенствование эксплуатации и системы контроля показателей качества нефтяных турбинных и трансформаторных масел, применяемых на Ленинградской, Курской, Смоленской АЭС.

*Анализ состояния турбинных и трансформаторных масел на АЭС. Разработка мероприятий по обеспечению качества турбинных и трансформаторных масел требованиям нормативных документов: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Л.А. Галимова; исполн.: В.А. Гашенко, С.Г. Амбарцумян, В.В. Мельников, Д.В. Курганов, Д.В. Шуварин. — Электрогорск, 2011. — 89 с. — Инв. № 398/11.*

**Анализ нормативной документации по организации контроля качества масел на АЭС. Разработка требований по стандартизации нормативной документации в области контроля качества и методов испытаний энергетических масел, применяемых на АЭС**

*Руководитель работы канд. хим. наук Л.А. Галимова;*

*исполнители: канд. хим. наук С.Г. Амбарцумян, Д.В. Шуварин*

Представлены результаты работы, выполненной ОАО «ЭНИЦ» по совершенствованию эксплуатации энергетических масел на АЭС. Объектом исследования являются турбинные масла, применяемые в маслосистемах ГЦН и ПНА АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-440. Выполнение работ направлено на повышение уровня эксплуатации энергетических масел, применяемых в маслосистемах реакторных цехов, совершенствование отраслевой нормативной документации по организации и проведению контроля качества, обращению энергетических масел на АЭС путем их стандартизации в целях повышения конкурентоспособности, технической и информационной со-вместимости, сопоставимости результатов испытаний и измерений.

*Анализ нормативной документации по организации контроля качества масел на АЭС. Разработка требований по стандартизации нормативной документации в области контроля качества и методов испытаний энергетических масел, применяемых на АЭС: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Л.А. Галимова; исполн.: С.Г. Амбарцумян, Д.В. Шуварин. — Электрогорск, 2012. — 103 с. — Инв.№ 412.12.*

**Разработка критериев оценки и показателей качества оборудования**

*Руководитель работы канд. техн. наук П.П. Савкин;*

*исполнители: инженеры Т.Ю. Афанасьева, С.В. Кондратьев*

Объектом разработки являются принципы систематизации и обработки данных по качеству оборудования, критерии оценки и показатели качества оборудования, поставляемого на АЭС». Цель работы – информационная поддержка закупочной деятельности в части обеспечения качества поставляемого оборудования на АЭС путем создания, эксплуатации и регулярной актуализации массива данных – базы данных по качеству оборудования, поставляемого на АЭС (БДК). Отмечается, что:

- база данных содержит систематизированную, классифицированную справочную и аналитическую информацию о качестве оборудования, необходимую для выбора поставщика оборудования для АЭС при проведении квалификационного отбора;
- на основе разработанных критериев и показателей качества, соответствующих требованиям нормативных документов, база данных позволяет оценить способность поставщиков (изготовителей) исполнения договоров поставки качественного и надежного оборудования для АЭС.

Представлены структурная схема базы данных по качеству (БДК) оборудования, а также содержащаяся в ней систематизированная информация

о качестве оборудования на всех этапах его жизненного цикла, при этом в БДК реализованы следующие функции:

- приведение исходных данных к унифицированной форме (шаблону), верификация данных;
- ввод, просмотр и корректировка данных;
- ведение реестра поручений уполномоченным организациям;
- оценка качества оборудования по разработанным критериям;
- обработка информации по разработанному алгоритму с представлением показателей качества для оценки надёжности и обоснованного выбора поставщика, изготовителя оборудования;
- хранение архивной информации (электронные копии документов), справочной информации и классификаторов контрагентов и оборудования;
- предоставление аналитической, архивной и справочной информации пользователям по их запросам и в соответствии с их статусом.

Отмечается также, что интерфейс БДК реализуется с помощью меню, обеспечивающего доступ пользователей к информации по каждой точке контроля качества, поручениям УО и возможность ввода исходных данных для поддержания БДК в актуальном состоянии.

*Разработка критериев оценки и показателей качества оборудования». Объектом разработки являются принципы систематизации и обработки данных по качеству оборудования, критерии оценки и показатели качества оборудования, поставляемого на АЭС: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. П.П. Савкин; исполн.: Т.Ю. Афанасьева, С.В. Кондратьев. — Электрогорск, 2012. — 44 с. — Инв. № 413.12.*

## **Разработка методики измерения скорости теплоносителя на основе метода теплозондирования**

*Исполнители: д-р техн. наук Э.А. Болтенко, инженер В.П. Шаров*

Представлено описание метода теплового зондирования потока, в котором в качестве зонда используется термopара с прямым нагревом чувствительного элемента, который дает возможность диагностировать как однофазные, так и двухфазные потоки, а также разработанного и изготовленного макета системы, позволяющей качественно отделить полезный сигнал, вырабатываемый чувствительным элементом термopарного измерителя скорости (ТИС), от сигнала, идущего от источника питания и помех в измерительной цепи. Схема защищена патентом РФ. Предложены также схемные исполнения ТИС, обеспечивающие тепловые потоки в зоне нагрева, достаточные для получения температурных напоров, требуемых для измерения скорости жидкости (газа) с приемлемой точностью. Приведены результаты испытаний ТИС на метрологическом стенде, получена функциональная связь температурного напора на чувствительном элементе ТИС от скорости потока воды, физических свойств воды и плотности теплового

потока в зоне нагрева. Предложена методика измерения скорости (расхода) теплоносителя с помощью ТИС в импульсном режиме.

*Разработка методики измерения скорости теплоносителя на основе метода теплондирования: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; исполн.: Э.А. Болтенко, В.П. Шаров. — Электрогорск, 2012. — 57 с. — Инв. № 401.12.*

### **Создание систематизированного массива информации о проводимой работе по оценке соответствия изготавливаемого оборудования для АЭС**

*Руководитель работы канд. техн. наук П.П. Савкин;  
исполнители: инженеры С.В. Кондратьев, О.В. Корнева*

Объектом разработки является формирование электронного массива информации о результатах работ уполномоченных организаций (УО) по оценке соответствия изготавливаемого оборудования для АЭС. Цель работы – создание систематизированного массива информации, характеризующего выполнение работ по оценке соответствия продукции в разрезе предприятий-изготовителей, АЭС, УО, центров закупок и контроль объемов выполняемых работ уполномоченными организациями при проведении оценки соответствия оборудования в форме приёмки (испытаний), в том числе, получение, перевод в электронный формат и обработка исходных данных. Отмечается, что с учётом целей и исходных данных, разработаны:

- принципы обработки и систематизации исходных данных;
- формы (шаблоны) для ввода поручений и отчетов уполномоченных организаций в информационную систему (базу данных);
- форма реестра поручений для представления пользователю.

Приводятся результаты выполненных на основе обработанных и систематизированных исходных данных работ, в том числе:

- сформирован и ведется реестр поручений, выдаваемых УО для выполнения работ по оценке соответствия продукции;
- ежеквартально формируются списки заводов-изготовителей, на которых УО ведут работы по приёмке оборудования;
- создан электронный массив информации о результатах работы УО по оценке соответствия изготавливаемого оборудования для АЭС.

Результаты, полученные в данной работе, используются:

- при подготовке программ проверок предприятий-изготовителей;
- для контроля, учёта объемов и эффективности работы уполномоченных организаций;
- для оценки качества продукции, изготавливаемой для АЭС.

Показаны также примеры использования систематизированной информации для оценки эффективности работы УО.

*Создание систематизированного массива информации о проводимой работе по оценке соответствия изготавливаемого оборудования для АЭС: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. П.П. Савкин; исполн.: С.В. Кондратьев, О.В. Корнева. — Электрогорск, 2013. — 105 с. — Инв. № 440/13.*

## **Отработка химической отмывки «карманов» парогенераторов ПГ**

*Руководитель темы инженер А.Р. Преловский;*

*исполнитель инженер В.А. Сафронов*

Объектом исследования являлась технология химической очистки «карманов» коллекторов ПГ от соединений меди и металлической меди и технология пассивации стали. Целью исследования являлось определение по финансовым, трудо- и временным затратам технологии очистки, обеспечивающей минимальные остаточные отложения соединений меди и металлической меди на поверхности металла «карманов» и испытание технологии их пассивации. Представлены результаты экспериментально апробированных методов (рецептур) удаления медьсодержащих отложений. Отмечается, что отработка рецептур технологии пассивации дала положительный результат в одном эксперименте; требуется проведение повторных экспериментов по оптимизации режимов пассивации поверхностей «карманов».

*Отработка химической отмывки «карманов» парогенераторов ПГ: отчет о НИР/ОАО «ЭНИЦ»; рук. А.Р. Преловский; исполн. В.А. Сафронов. — Электрогорск, 2013. — 153 с. — Инв. № 445/13.*

## **Анализ технико-экономических показателей маслоочистительного оборудования, предлагаемого производителями. Разработка рекомендаций и мероприятий по индивидуальному применению маслоочистительного оборудования в маслосистемах энергоблоков всех АЭС**

*Руководитель работы канд. хим. наук Л.А. Галимова;*

*исполнители: канд. хим. наук С.Г. Амбарцумян, от ООО «Микронинтер» — инженеры А.В. Мельников, Д.В. Курганов, Д.В. Шуварин*

В работе представлен анализ данных о состоянии, сроке службы и характеристикам маслоочистительного оборудования, находящегося в эксплуатации на АЭС, выполненный на основании информационных опросных листов.

Отмечается, что обследование и анализ опыта применения различных технологий очистки, марок маслоочистительного оборудования (МОО) проведены в технологических системах энергоблоков и на масляном хозяйстве Нововоронежской АЭС, Балаковской АЭС и Кольской АЭС, в том числе выполнен анализ эксплуатационной документации, определена эффективность действия штатного маслоочистительного оборудования на основании отчётов по испытаниям, имеющихся на АЭС, разработаны мероприятия по дополнительному оснащению их современным маслоочистительным оборудованием.

Кроме того, проведён анализ требований действующих отраслевых нормативных документов к техническим характеристикам и применению маслоочистительного оборудования на АЭС и определены основные критерии проверки соответствия маслоочистительного оборудования отраслевым требованиям.

Приведены результаты анализа различных технологий очистки масел, технических характеристик МОО, определена область их применения на АЭС, проверено соответствие их отраслевым требованиям на основании данных документации фирм-изготовителей МОО, разработан перечень маслоочистительного оборудования, соответствующего требованиям нормативных документов, действующих на АЭС и представлены данные анализа технико-экономических показателей выпускаемого и применяемого на АЭС маслоочистительного оборудования с рекомендацией для конкретных энергоблоков.

*Анализ технико-экономических показателей маслоочистительного оборудования, предлагаемого производителями. Разработка рекомендаций и мероприятий по индивидуальному применению маслоочистительного оборудования в маслосистемах энергоблоков всех АЭС: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. Л.А. Галимова; исполн.: С.Г. Амбарцумян, А.В. Мельников, Д.В. Курганов, Д.В. Шуварин. — Электрогорск, 2013. — 111 с. — Инв. № 436/13.*

**Оказание услуг по направлению обеспечения эксплуатационной готовности АЭС в части оптимизации технических решений по коррекционной обработке охлаждающей воды конденсаторов АЭС. Оптимизация технических решений по ВХР 1-го контура НВ АЭС-2**  
*Руководитель работы инженер А.Р. Преловский;*  
*исполнители: инженеры Е.В. Муравьев, О.В. Шатерникова, В.А. Сафронов*

В работе приведены результаты анализа материалов по проблеме защиты конденсаторов энергоблоков № 3, 4 Ростовской АЭС и Нововоронежской АЭС-2 от органических и минеральных отложений с помощью технологии коллоидного ингибирования ВЕОКРОСОЛ, а также по поддержанию ВХР I контура НВО АЭС-2 в условиях маневренного режима нагрузок.

*Оказание услуг по направлению обеспечения эксплуатационной готовности АЭС в части оптимизации технических решений по коррекционной обработке охлаждающей воды конденсаторов АЭС. Оптимизация технических решений по ВХР 1-го контура НВ АЭС-2: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. А.Р. Преловский; исполн.: Е.В. Муравьев, О.В. Шатерникова, В.А. Сафронов. — Электрогорск, 2013. — 30 с. — Инв. № 437/13.*

**Проведение стендовых испытаний уплотняющих пар импульсно-предохранительных клапанов на эрозионно-коррозионную износостойкость**

*Руководитель работы инженер А.Р. Преловский;*  
*исполнители: инженеры Е.В. Муравьев, В.А. Сафронов, А.В. Столпник*

Цель работы – проведение сравнительных испытаний деталей затворов клапана 25ИКЭМ.4002А-0 на стойкость к эрозионно-коррозионному износу (ЭКИ) в зависимости от варианта изготовления из различных материалов на стенде МПК ОАО «ЭНИЦ» с 24.09.2013 по 12.11.2013.

Отмечается, что испытаниям подвергались модели деталей затвора (пар тарели и седла – испытуемые изделия) предохранительного клапана, входящего в состав клапана 25ИКЭМ.4002А-0. Модельные пары деталей затвора для испытаний были исполнены в пяти вариантах, различающихся материалом.

Варианты исполнения пар деталей затвора:

- № 1 – седло и тарель из стали 95Х18;
- № 2 – седло и тарель из стали ХН35-ВТ;
- № 3 – седло и тарель с наплавленными уплотнительными поверхностями (ЦН 6);
- № 4 – седло и тарель из стали 10Х18Н11С5М2ТЮ (ЭП 987);
- № 5 – седло и тарель из титанового сплава.

Испытуемые изделия были помещены в испытательные установки, в которых создавались реальные условия работы предохранительного клапана 25ИКЭМ.4002А-0. Для увеличения скорости эрозионно-коррозионного износа между испытуемыми изделиями в испытательных установках была организована контролируемая неплотность.

В данной работе представлены:

- описание испытательного стенда МПК;
- описание хода проведения испытаний на стенде МПК;
- данные по мониторингу параметров испытаний;
- результаты осмотра испытуемых изделий после проведения испытаний на эрозионно-коррозионную стойкость.

По результатам испытаний выпущено «Техническое решение» ОАО «Концерн Росэнергоатом» о применении выявленных в результате испытаний наиболее стойких к ЭКИ материалов для изготовления деталей затворов ИПК.

*Проведение стендовых испытаний уплотняющих пар импульсно-предохранительных клапанов на эрозионно-коррозионную износостойкость: отчет о НИР / ОАО «ЭНИЦ»; рук. А.Р. Преловский; исполн.: Е. В. Муравьев, В.А. Сафронов, А.В. Столпник. — Электрогорск, 2013. — 49 с. — Инв. № 438/13.*

### **Оказание консультационных услуг по возможной оптимизации конструкции защитного устройства для минусовых импульсных линий уровнемеров парогенераторов**

*Руководитель работы инженер А.Р. Преловский;  
исполнители: инженер Е.В. Муравьев, О.В. Шатерникова, В.А. Сафронов,  
Ю.Г. Герасимюк*

Объектом исследования являются защитные устройства для минусовых импульсных линий уровнемеров парогенераторов.

Целью исследования является разработка предложений по модернизации защитных устройств «минусовых» отборов уровнемеров путём доработки конструктивных элементов для более эффективного выхода загрязнений из импульсных линий однокамерных уровнемеров.

Представлены результаты проведённых сравнительных испытаний четырёх видов новых конструкций защитных устройств «минусовых» отборов уровнемеров.

Приведены результаты сравнительной оценки каждой конструкции защитного устройства, в том числе штатного защитного устройства. Отмечается целесообразность использования защитного устройства альтернативной конструкции.

*Оказание консультационных услуг по возможной оптимизации конструкции защитного устройства для минусовых импульсных линий уровнемеров парогенераторов: отчет о НИР / АО «ЭНИЦ»; рук. А.Р. Преловский; исполн.: Е.В. Муравьев, О.В. Шатерникова, В.А. Сафронов, Ю.Г. Герасимюк. — Электрогорск, 2014. — 45 с. — Инв. № 462/14.*

**Анализ требований отраслевых нормативных документов к организации эксплуатации маслохозяйства на АЭС. Проведение обследования маслохозяйств Калининской и Кольской АЭС. Разработка технического отчёта, содержащего рекомендации и мероприятия по совершенствованию технологических процессов приёма, хранения, подготовки к заливу и подаче в тепломеханическое и электротехническое оборудование турбинных и трансформаторных масел, а также сбора и утилизации отработанных масел с учётом предложений АЭС**

*Руководитель работы канд. техн. наук Л.А. Галимова; исполнители: инженер Д.В. Селезнёв, канд. хим. наук С.Г. Амбарцумян*

В работе представлены результаты:

- анализа требований нормативных документов по организации эксплуатации маслохозяйств на АЭС;
- обследования и анализа организации эксплуатации масляного хозяйства на Кольской АЭС;
- обследования и анализа организации масляного хозяйства на Калининской АЭС;
- разработки рекомендаций и мероприятий по совершенствованию технологических процессов приёма, хранения, подготовки к заливу и подачи в тепломеханическое и электротехническое оборудование турбинных и трансформаторных масел, а также сбора и утилизации отработанных масел на АЭС.

Отмечается, что выполнение работ направлено на повышение уровня эксплуатации энергетических масел, применяемых на АЭС, в части совершенствования организации системы приёмки, хранения, очистки масел, улучшения технико-экономических показателей за счёт повышения промышленной чистоты и продления ресурса эксплуатирующихся масел, снижения затрат на приобретение масел, увеличение сроков межремонтного периода оборудования.

*Анализ требований отраслевых нормативных документов к организации эксплуатации маслохозяйства на АЭС. Проведение обследования маслохозяйств Калининской и Кольской АЭС. Разработка технического отчёта, содержащего рекомендации и мероприятия по совершенствованию технологических процессов приёма, хранения, подготовки к заливу и подаче в тепломеханическое и электротехническое оборудование турбинных и трансформаторных масел, а также сбору и утилизации отработанных масел с учётом предложений АЭС: отчет о НИР/АО «ЭНИЦ»; рук. Л.А. Галимова; исполн.: Д.В. Селезнёв, С.Г. Амбарцумян. — Электрогорск, 2014. — 131 с. — Инв. № 463/14.*

## **Испытания пластинчатых теплообменников типов М6, М10 и М15 производства ОАО «Альфа Лаваль Поток» с целью подтверждения их проектных тепловых и гидравлических характеристик**

*Руководитель испытания И.С. Лабыкин; исполнители: канд. техн. наук Н.А. Брус, А.В. Столпник, С.М. Никонов (АО «ЭНИЦ»); А.С. Каширин, Т.В. Рудакова, Е.В. Исмаилова (ОАО «Альфа Лаваль Поток»); И.Н. Голышев (АО «ВПО ЗАЭС»)*

Испытания были проведены в период с 8 по 12 декабря 2014 г. на площадке АО «ЭНИЦ» с целью подтверждения проектных тепловых и гидравлических характеристик теплообменников.

Испытания проводились в соответствии с программой испытаний пластинчатых теплообменников, поставляемых на российские АЭС, разработанной и утвержденной АО «ЭНИЦ», согласованной с ОАО «Концерн «Росэнергоатом» и ОАО «Альфа Лаваль Поток».

Результаты испытаний пластинчатых теплообменников типов М6, М10 и М15 приведены в протоколах испытаний:

- протокол № 3 от 15.12.14 г. испытания пластинчатого теплообменника типа М6 с целью подтверждения тепло-гидравлических характеристик;
- протокол № 2 от 11.12.14 г. испытания пластинчатого теплообменника типа М10 с целью подтверждения тепло-гидравлических характеристик;
- протокол № 1 от 08.12.14 г. испытания пластинчатого теплообменника типа М15 с целью подтверждения тепло-гидравлических характеристик.

В ходе испытаний определены фактических тепловые и гидравлические характеристики пластинчатых теплообменников типов М6, М10 и М15, производства Альфа Лаваль, и произведено сравнение их с проектными значениями.

В результате испытаний были подтверждены расчетные тепловые и гидравлические характеристики теплообменников. Отчетные материалы по испытаниям приняты Заказчиком и согласованы ОАО «Концерн Росэнергоатом».

*Испытания пластинчатых теплообменников типов М6, М10 и М15 производства ОАО «Альфа Лаваль Поток» с целью подтверждения их проектных тепловых и гидравлических характеристик: протокол № 3 от 15.12.14 г., протокол № 2 от 11.12.14 г.; протокол № 1 от 08.12.14 г. / АО «ЭНИЦ»: рук. И.С. Лабыкин; исполн.: Н.А. Брус, А.В. Столпник, С.М. Никонов и др. — Электрогорск, 2014. — Инв. № 506/17*

## **Экспериментальное обоснование работоспособности эжектора основного типа ЭПО-3-150 для турбоустановки К-1000-60/1500**

*Руководитель темы д-р техн. наук И.В. Ёлкин; руководитель работы канд. техн. наук Е.И. Трубкин; исполнители: канд. техн. наук С.М. Никонов, Д.И. Дорофеев*

В работе представлены результаты стендовых испытаний работоспособности эжектора основного ЭПО-3-150 для турбоустановки К-1000-60/1500 и установлено, что:

- параметры рабочей среды (пар) соответствуют заявленным;
- параметры охлаждающей воды на трубную систему эжектора соответствуют заявленным;
- расход воздуха (пассивная среда) составляет 172 кг/час, что ниже заявленного (200 кг/час);
- величина вакуума в приёмной камере эжектора зависит от расхода воздуха от 3 кПа (задвижка в линии воздуха закрыта) до 47 кПа (задвижка в линии воздуха открыта полностью) — не соответствует заявленным;
- дисбаланс тепловой мощности, подводимой к эжектору рабочей средой и отводимой охлаждающим теплоносителем, находится в пределах точности измерений.

Сформулированы предложения по доработке эжектора.

*Экспериментальное обоснование работоспособности эжектора основного типа ЭПО-3-150 для турбоустановки К-1000-60/1500: отчет о НИР/АО «ЭНИЦ»; рук.: И.В. Ёлкин, Е.И. Трубкин; исполн.: С.М. Никонов, Д.И. Дорофеев. — Электрогорск, 2014. — 41 с. — Инв. № 464/14.*

## **Подбор и анализ документов по эксплуатации импортных огнестойких турбинных масел на российских АЭС. Анализ требований технической документации производителей турбинного оборудования для обеспечения соответствия технических характеристик работы систем турбоустановок эксплуатационным требованиям при применении импортных огнестойких турбинных масел. Обследование состояния эксплуатации импортных огнестойких турбинных масел на Калининской и Кольской АЭС. Разработка технического отчёта, включающего предложения и рекомендации по совершенствованию эксплуатации импортных огнестойких турбинных масел на АЭС**

*Руководитель работы канд. хим. наук Л.А. Галимова; исполнители: инженер Д.В. Селезнёв, канд. хим. наук С.Г. Амбарцумян*

Отмечается, что надёжность работы маслonaполненного энергетического оборудования, увеличение межремонтного периода, трудозатраты на его ремонт и эксплуатацию в значительной мере зависят от состояния масла, залитого в маслосистемы. Поэтому основная задача при эксплуатации энергетических масел — обеспечить поддержание в течение длительного срока

физико-химических показателей качества масла на уровне, установленном требованиями нормативно-технических документов.

Анализ опыта эксплуатации масел на АЭС показывает, что для обеспечения надёжной и безопасной работы тепломеханического оборудования необходимо комплексное решение вопросов, связанных с применением масел высокого качества, состоянием чистоты маслосистем, поддержанием нормированных значений показателей масла в процессе эксплуатации, использованием современных средств очистки масел и совершенствованием системы химического контроля качества масел.

Целью работы является повышение уровня эксплуатации синтетических огнестойких турбинных масел, применяемых на АЭС, в части обеспечения и поддержания качества, надёжной эксплуатации и продления срока службы в маслосистемах турбоагрегатов АЭС.

Объектом исследования являются маслосистемы турбинных установок, масляное хозяйство атомных станций в части анализа их организации, состояния эксплуатации.

Представлены конкретные мероприятия, направленные на повышение эксплуатационной надёжности и безопасности энергоблоков АЭС, улучшение технико-экономических показателей за счёт повышения чистоты эксплуатирующихся масел, снижение расходов на приобретение новых огнестойких турбинных масел и увеличение сроков межремонтного периода оборудования.

*Подбор и анализ документов по эксплуатации импортных огнестойких турбинных масел на российских АЭС. Анализ требований технической документации производителей турбинного оборудования для обеспечений эксплуатации и соответствия технических характеристик работы систем турбоустановок эксплуатационным требованиям при применении импортных огнестойких турбинных масел. Обследование состояния эксплуатации импортных огнестойких турбинных масел на Калининской и Кольской АЭС. Разработка технического отчёта, включающего предложения и рекомендации по совершенствованию эксплуатации импортных огнестойких турбинных масел на АЭС: отчет о НИР / АО «ЭНИЦ»; рук. Л.А. Галимова; исполн.: Д.В. Селезнёв, С.Г. Амбарицумян. — Электрогорск, 2015. — 203 с. — Инв. № 474/15.*

**Сбор данных, верификация и формирование информационных ресурсов о качестве оборудования, поставляемого на действующие и строящиеся атомные станции ОАО «Концерн Росэнергоатом».**  
**Мониторинг достижения целей в области качества продукции, работы поставщиков, изготовителей и уполномоченных организаций**  
*Руководитель работы канд. техн. наук П.П. Савкин;*  
*исполнители: инженеры Т.Ю. Афанасьева, С.В. Кондратьев, О.В. Корнева, М.Ю. Куликов, В.В. Сысоева, А.И. Мороз, Н.Е. Бирюкова*

Объектом работы является сбор данных, верификация, формирование информационных ресурсов о качестве оборудования, анализ и подготовка

оперативной информации по результатам контроля качества оборудования, поставляемого на АЭС.

В работе представлены:

- собранная, обработанная и проанализированная информация о качестве оборудования, изготавливаемого и поставляемого на строящиеся и действующие АЭС;
- собранная и подготовленная оперативная информация по результатам контроля качества оборудования, при этом сформированный соответствующий электронный информационный массив данных установлен на технических средствах Заказчика;
- разработанный шаблон для ввода данных о несоответствиях, выявленных при проведении ПНР, из Excel-таблиц исходных данных;
- разработанная выходная форма для WEB-интерфейса «Оценка изготовителя»;
- модифицированная форма для ввода в ИАС БДК данных о поручениях, выданных УО;
- актуализированный реестр поручений, внесённых в ИАС БДК;
- составленные списки заводов-изготовителей, на которых УО ведут работы по оценке соответствия;
- результаты осуществлённого сбора, обработки и систематизации данных о несоответствиях с анализом причин несоответствий;
- результаты выполненного анализа актов ВК действующих и строящихся АЭС с заключением об их соответствии требованиям РД ЭО 1.1.2.01.0931-2013, РД ЭО 1.1.2.05.0929-2013 и нормативной документации и данные анализа несоответствий, выявленных на входном контроле продукции, прошедшей оценку соответствия ФГУП ВО «Безопасность» и АО «ВПО «ЗАЭС»;
- составленные реестры:
  - ✧ решений о применении импортного оборудования, изделий, материалов и комплектующих;
  - ✧ несоответствий, выявленных при проведении ПНР;
  - ✧ несоответствий, выявленных при эксплуатации (эксплуатационные отказы).

Отмечается, что результаты, полученные в данной работе, используются:

- при оценке качества продукции предприятий;
- при проведении системного анализа несоответствий и разработке мероприятий по управлению несоответствиями;
- в качестве дополнительной информации для заказчика при проведении конкурсов на поставку оборудования для АЭС;
- при подготовке программы проверки предприятий-изготовителей;
- для разработки и совершенствования программ обеспечения качества разработчиков/изготовителей при разработке и изготовлении продукции.

*Сбор данных, верификация и формирование информационных ресурсов о качестве оборудования, поставляемого на действующие и строящиеся атомные станции ОАО «Концерн Росэнергоатом». Мониторинг достижения целей в области качества продукции, работы поставщиков, изготовителей и уполномоченных организаций. Рассмотрение и согласование программ обеспечения качества заводов-изготовителей при разработке и изготовлении важного для безопасности АЭС оборудования за второй и третий кварталы 2015 года: отчет о НИР / АО «ЭНИЦ»; рук. П.П. Савкин; исполн.: Т.Ю. Афанасьева, С.В. Кондратьев, О.В. Корнева, М.Ю. Куликов, В.В. Сысоева, А.И. Мороз, Н.Е. Бирюкова. — Электрогорск, 2015. — 625 с. — Инв. № 475/15.*

### **Проведение приёмочных испытаний головного образца деаэратора подпитки и борного регулирования на соответствие требованиям 1113.00.00.000ТЗ, разработанного ОАО «СПБАЭП»**

*Председатель комиссии инженер А.Н. Наконечный (Ленинградская АЭС-2); члены комиссии: инженеры С.Л. Кузнецов (АО ВПО «ЗАЭС»), А.А. Андреев (филиал АО «Концерн Титан-2»), И.С. Лыбыкин (ЭНИЦ), канд. техн. наук Н.А. Брус, канд. техн. наук С.М. Никонов (ЭНИЦ)*

Представлены результаты приёмочных испытаний в АО «ЭНИЦ» в период с 30.10.2016 по 03.11.2016 г. головного образца деаэратора подпитки и борного регулирования ДА 65/20 (зав. № 106), изготовленного ОАО «Сибэнергомаш» в соответствии с требованиями 1113.00.00.000ТЗ и при штатных режимах и параметрах эксплуатации, в том числе с подачей газа (гелия).

*Проведение приёмочных испытаний головного образца деаэратора подпитки и борного регулирования на соответствие требованиям 1113.00.00.000ТЗ, разработанного ОАО «СПБАЭП»: протокол от 03.11.2016 № 173-13/03-2016 / АО «ЭНИЦ», АО «Концерн Титан-2». — Электрогорск, 2016. — 72 с. — Инв. №485/17.*

### **Ресурсные испытания элементов оборудования АС для обоснования ресурсных характеристик и определения предельных состояний.**

*Руководитель работы А.В. Звонарёв; исполнители: Ю.А. Серебренников, Т.Ю. Афанасьева, Д.В. Богомолов, А.В. Басов*

Отмечается, что в ходе выполнения работ проведен контроль технического состояния образцов соединителей СНЦ ЗМ, измерительных преобразователей типа Ш-78, Ш-79 и блоков аппаратуры авторегулирования «Каскад-2», находившихся в условиях эксплуатации на втором энергоблоке Калининской АЭС в течение 30 лет, с целью подтверждения соответствия их технических характеристик техническим условиям изготовления.

Представлены результаты ресурсных испытаний указанных образцов КИП и А в аккредитованных лабораториях на ускоренное старение, а также испытаний образцов соединителей СНЦ ЗМ на стойкость к внешним воздействующим факторам проектной аварии.

Результаты проведенных испытаний показали, что соединители СНЦ ЗМ, измерительные преобразователи типа Ш-78, Ш-79 и блоки авторегулирования «Каскад-2» сохранили свои функциональные показатели

после проведения ресурсных испытаний методом ускоренного старения и испытаний на стойкость к воздействию внешних воздействующих факторов максимальной проектной аварии (в части соединителей СНЦ 3М): электрические параметры образцов КИП и А соответствуют техническим условиям, техническим описаниям и инструкциям по эксплуатации; изменений внешнего вида, отклонений значений электрических и механических параметров испытанных образцов КИП и А от заданных техническими условиями на изготовление изделий зафиксировано не было.

По результатам испытаний делается вывод, что соединители СНЦ 3М, измерительные преобразователи типа Ш-78, Ш-79 и блоки авторегулирования «Каскад-2» сохраняют свои функциональные характеристики после 30 лет эксплуатации на АЭС и моделируемого дополнительного срока службы – 3 года.

*Ресурсные испытания элементов оборудования АС для обоснования ресурсных характеристик и определения предельных состояний: отчет о НИР / АО «ЭНИЦ»; рук. А.В. Звонарёв; исполн.: Ю.А. Серебrenников, Т.Ю. Афанасьева, Д.В. Богомолов, А.В. Басов – Электрогорск, 2017 – 227 с. – инв. № 499/17.*

**Квалификационные испытания клапана впускного БДЗУ ОК.500. АТ.133-01 в соответствии с требованиями программы и методики испытаний ПМ-ОК-141-013-КИ, разработанной АО «ОКАН»**

*Руководитель испытаний канд. техн. наук Н.А. Брус;  
исполнители: В.И. Акинин, Г.А. Климова*

Испытания проводились на образце впускного клапана ОК.500.АТ.133-01 зав. № 5689/15/1/1, изготовленного по техническим требованиям ТТ-ОК-141-013 изм.1, в период с 3 по 7 апреля 2017 г. на специально смонтированном и аттестованном для данного вида испытаний стенде ВпК в АО «ЭНИЦ».

Испытания проведены при следующих параметрах рабочей среды (воды):

- давление до 17,15 МПа;
- температура до 166 °С.

Работы по программе и методике квалификационных испытаний ПМ-ОК-141-013-КИ выполнены в полном объеме. Результаты испытаний положительные.

По результатам испытаний выпущен протокол от 07.04.2017 № 173-13/07–2017. Отчетные материалы по испытаниям приняты Заказчиком.

**Квалификационные испытания клапана обратного БДЗУ ОК.500. АР.133-01 в соответствии с требованиями программы и методики испытаний ПМ-ОК-141-013-КИ, разработанной АО «ОКАН»**

*Руководитель испытаний канд. техн. наук Н.А. Брус;  
исполнители: В.И. Акинин, канд. техн. наук В.Н. Жилко*

Испытания проводились на образце обратного клапана ОК.500.АР.133-01 зав. № 5689/15/2/1, изготовленного по техническим требованиям ТТ-

ОК-141-013 изм. 1 в период с 20 по 27 апреля 2017 г. на специально смонтированном и аттестованном для данного вида испытаний стенде ВпК в АО «ЭНИЦ».

Испытания проведены при следующих параметрах рабочей среды (воды):

- давление до 17,15 МПа;
- температура до 230 °С.

Работы по программе и методике квалификационных испытаний ПМ-ОК-141-013-КИ выполнены в полном объеме. Результаты испытаний положительные.

По результатам испытаний выпущен протокол от 27.04.2017 № 173-13/08–2017. Отчетные материалы по испытаниям приняты Заказчиком.

**Квалификационные испытания запорного узла «тарель-седло» производства ООО «Интерарм» предохранительного клапана 25ИКЭМ.4002А-300, изготовленного по 25ИКЭМ.4002-0ТУ**

*Руководитель испытаний кандю иехн. наук Н.А. Брус;*

*Исполнители: В.И. Акинин, Г.А. Климова*

Испытания проводились на образцах тарель ч. 25ИКЭМ.4002А-320СБ с изм. 8, седло ч. 25ИКЭМ.4002А-310СБ с изм. 9, упор ч. 25ИКЭМ.4002А-314 с изм. 7 и кольцо ч. 25ИКЭМ.4002А-328 с изм. 2 производства ООО «Интерарм», входящих в запорный узел предохранительного клапана 25ИКЭМ.4002А-300. 8 февраля 2017 г. на специально смонтированном и аттестованном для данного вида испытаний стенде ИКЭМ в АО «ЭНИЦ».

Испытания проведены при следующих параметрах рабочей среды (пара):

- давление до 9 МПа;
- температура до 300 °С.

Работы по программе и методике квалификационных испытаний ПМ5-01 ПМ1 для п.6.1 в, г, д, е выполнены в полном объеме. Результаты испытаний положительные.

По результатам испытаний выпущен протокол от 08.02.2017 № 173-13/04–2017. Отчетные материалы по испытаниям приняты Заказчиком.

**Квалификационные испытания представительных образцов силовых и контрольных кабелей блока №1 и кабелей типа КПЭТИ блока №3 Кольской АЭС на устойчивость к повреждающим факторам максимальной проектной аварии в соответствии с техническим заданием, разработанным АО «НЦ «Техэкспертиза»**

*Руководитель испытаний канд. техн. наук Н.А. Брус;*

*Исполнители: В.И. Акинин, канд. техн. наук В.Н. Жилко*

Испытания проводились в период с 31 марта по 1 апреля 2017 года для нижеперечисленных образцов силовых и контрольных кабелей энергоблоков №1 и №3 Кольской АЭС:

- КПЭТИ-хк 1х2х0,35 3 шт.;

- |            |         |        |
|------------|---------|--------|
| • КУГВЭВнг | 7x0,5   | 1 шт.; |
| • КМПЭВЭ   | 4x1     | 1 шт.; |
| • МКШ      | 10x0,35 | 1 шт.; |
| • КВВГ     | 7x1     | 1 шт.; |
| • КВВГ     | 4x1,5   | 1 шт.  |

Испытания проведены при следующих параметрах рабочей среды (воды/пара):

- давление от 0,095 до 0,27 МПа;
- температура от 90 до 132 °С.

Программы и методики испытаний:

- «Программа квалификационных испытаний образцов кабелей КПЭ-ТИ энергоблока №3 Кольской АЭС на устойчивость к повреждающим факторам максимальной проектной аварии» 356-1/2016, разработанная АО «АО «НЦ «Техэкспертиза», согласованная филиалом АО «Концерн Росэнергоатом» «Кольская атомная станция»;
- «Программа квалификационных испытаний образцов кабелей МКШ, КВВГ, КМПЭВЭ энергоблока №1 Кольской АЭС на устойчивость к повреждающим факторам максимальной проектной аварии» 356-2/2016, разработанная АО «АО «НЦ «Техэкспертиза», согласованная филиалом АО «Концерн Росэнергоатом» «Кольская атомная станция».

Работы по программе квалификационных испытаний 356-1/2016 и программе квалификационных испытаний 356-2/2016 выполнены в полном объеме. Результаты испытаний положительные.

По результатам испытаний выпущен протокол от 13.04.2017 №173-13/06–2017. Отчетные материалы по испытаниям приняты Заказчиком.

# РАБОТЫ АО «ЭНИЦ» 2018–2023 гг.

## **Разработка и аттестация специализированного расчётного кода для прогнозирования возникновения гидроударов в оборудовании АЭС**

*Руководитель работы: д-р техн. наук В.И. Мелихов*

*Исполнители: главный научный сотрудник, д-р техн. наук И.В. Елкин, ведущий научный сотрудник С.Е. Якуш, старший научный сотрудник А.А. Неровнов, младший научный сотрудник Н.А. Ртищев, специалист 1-й категории Г.Ю. Волков, специалист 1-й категории А.Ш. Исхаков, инженер Е.В. Вилюра, инженер А.А. Шкель, главный специалист А.В. Басов, инженер 1-й категории О.Н. Трубкин*

Опыт эксплуатации водо-водяных реакторов указывает на то, что в элементах АЭС могут происходить гидроудары, оказывающие дополнительные воздействия на оборудование. Гидроудары могут возникать, в частности, в системе аварийного газоудаления, в коллекторах и трубчатке парогенераторов, в трубопроводах питательной воды парогенераторов АЭС с ВВЭР, в деаэрационно-питательной установке АЭС с ВВЭР при пусконаладочных работах, а также при срабатывании БРУ-А. Гидроудары происходили в коллекторе питательной воды парогенератора АЭС с ВВЭР- 440 «Ловиза», в узлах водопитания АЭС с ВВЭР-1000 Нововоронежской АЭС и Калининской АЭС, трубопроводах ДУ 300 системы аварийного расхолаживания ПГ, маслосистемах смазки и регулирования энергоблока №6 Нововоронежской АЭС с ВВЭР-1200.

Системные теплогидравлические коды, использующиеся для детерминистского анализа безопасности в проектных и конструкторских организациях, не предназначены для расчета конденсационного гидроудара, так как анализ данного явления требует специальной численной схемы, ориентированной на расчеты ударных воздействий. Для достоверного прогнозирования конденсационных гидроударов и выработки мероприятий по их исключению при проектировании, пуско-наладке и эксплуатации требуется применение аттестованного специализированного расчетного кода.

В ходе работ был разработан специализированный расчетный код для моделирования конденсационных гидроударов. Основные характеристики и особенности кода состоят в следующем:

- Используется одномерная нестационарная двухжидкостная модель пароводяной смеси на основе шести уравнений сохранения массы, импульса и энергии;
- Карта режимов течения включает в себя два режима: дисперсный и горизонтально расслоенный;

- Замыкающие соотношения описывают межфазный массо-теплоперенос и обмен импульсом. Также учитывается трение потока о стенку канала. Соотношения зависят от режима течения потока;
- В модели учтено влияние упругости трубы и изменяющегося поперечного сечения трубы на характеристики потока;
- Код использует свои собственные таблицы свойств воды и пара;
- Явная численная схема, основанная на расщеплении оператора: на первом шаге используются аппроксимация по потоку конвективного члена (по направлению характеристики) и нерелаксационные источниковые члены, на втором шаге аппроксимируются жесткие релаксационные источниковые члены (описывающие межфазное взаимодействие). Численная диффузия может подавляться путем аппроксимации конвективных членов со вторым порядком;
- Вычисление сил, действующих на трубу.

Расчетная программа имеет гибкий и дружелюбный по отношению к пользователю интерфейс. Все физические и геометрические параметры, характеризующие рассматриваемую систему трубопроводов, задаются в файле входных данных. Помимо этого, в файле входных данных имеется возможность задания служебной информации, позволяющей настроить удобный и наглядный вывод полученных результатов расчета для их последующего анализа.

Расчетный код написан на языке программирования FORTRAN и имеет объектно-ориентированную структуру. Код состоит из нескольких подпрограмм, основными из которых являются:

- главная (управляющая) программа,
- подпрограмма обработки входных данных,
- подпрограмма выдачи информации,
- подпрограмма расчета одного временного шага,
- подпрограмма расчета собственных значений,
- подпрограмма расчета источниковых членов,
- подпрограмма расчета граничных условий, соединений, ветвлений,
- подпрограмма расчета свойств воды.

Все описанные выше работы подробно изложены в отчетных документах [1–3], выпущенных по договору.

Была создана экспериментальная установка для получения опытных данных, необходимых для верификации специализированного расчетного кода для прогнозирования возникновения конденсационных гидроударов в оборудовании АЭС.

При выполнении работы решены следующие задачи:

- подготовлено техническое задание для проектирования экспериментальной установки;
- определены требования к системе измерений;

- разработан рабочий проект;
- изготовлены узлы и детали, выполнен монтаж экспериментальной установки;
- определен диапазон изменения основных параметров;
- разработана программа и методика испытаний;
- выполнены экспериментальные исследования;
- подготовлен отчёт об экспериментальных исследованиях конденсационного гидроудара [4], включающий опытные данные для верификации специализированного расчетного кода.

Для выполнения верификации специализированного расчетного кода для прогнозирования гидроударов была разработана матрица верификации. При её разработке были проанализированы основные физические явления, определяющие протекание конденсационного гидроудара, а затем структурированы эксперименты с целью установления влияния основных параметров (давление, температура и расход воды) на динамику взаимодействия неогретой воды с насыщенным паром.

Выполнены верификационные расчеты с помощью специализированного расчётного кода в соответствии с матрицей верификации.

Проведена оценка точности результатов расчетов с помощью метода стохастической аппроксимации. Получено удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Проведено усовершенствование расчётного кода по итогам верификационных расчетов. Усовершенствование состоит в модификации описания перехода от горизонтально стратифицированного двухфазного течения к дисперсному течению. Это привело к улучшению соответствия расчетных и экспериментальных результатов.

Подробное описание работ по верификации расчетного кода представлено в отчете [5].

На основе полученных результатов был подготовлен отчет о верификации специализированного расчетного кода для моделирования конденсационных гидроударов [6] в соответствии с требованиями нормативного документа РД 03-34-2000 «Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии».

Все выполненные в рамках договора работы и полученные при этом результаты изложены в Итоговом отчете [7].

*1. Разработка и аттестация специализированного расчётного кода для прогнозирования возникновения гидроударов в оборудовании АЭС. Техническая справка; рук. В.И. Мелихов; исполн.: С.Е. Якуш, А.А. Неровнов, Н.А. Ртищев, Г.Ю. Волков, А.Ш. Исхаков, Е.В. Вилюра, А.А. Шкель. — Электрогорск, 2018. — 170 с. — Инв. № 517/18.*

2. *Разработка и аттестация специализированного расчётного кода для прогнозирования возникновения гидроударов в оборудовании АЭС. Руководство пользователя;* рук. В.И. Мелихов; исполн.: С.Е. Якуш, А.А. Неровнов, Н.А. Ртищев, Г.Ю. Волков, А.Ш. Исхаков, Е.В. Вилюра, А.А. Шкель. — *Электрогорск, 2018. — 58 с. — Инв. № 518/18.*

3. *Разработка и аттестация специализированного расчётного кода для прогнозирования возникновения гидроударов в оборудовании АЭС. Руководство программиста;* рук. В.И. Мелихов; исполн.: С.Е. Якуш, А.А. Неровнов, Н.А. Ртищев, Г.Ю. Волков, А.Ш. Исхаков, Е.В. Вилюра, А.А. Шкель. — *Электрогорск, 2018. — 30 с. — Инв. № 519/18.*

4. *Разработка и аттестация специализированного расчётного кода для прогнозирования возникновения гидроударов в оборудовании АЭС. Отчет о проведении экспериментальных исследований гидроудара;* рук. В.И. Мелихов; исполн.: И.В. Елкин, А.В. Басов, О.Н. Трубкин, Г.Ю. Волков. — *Электрогорск, 2018. — 93 с. — Инв. № 546/18.*

5. *Разработка и аттестация специализированного расчётного кода для прогнозирования возникновения гидроударов в оборудовании АЭС. Отчет по этапу №3, включающий результаты верификационных расчетов;* рук. В.И. Мелихов; исполн.: С.Е. Якуш, А.А. Неровнов, Н.А. Ртищев, Г.Ю. Волков, А.Ш. Исхаков, Е.В. Вилюра. — *Электрогорск, 2018. — 79 с.*

6. *Разработка и аттестация специализированного расчётного кода для прогнозирования возникновения гидроударов в оборудовании АЭС. Отчет о верификации программного средства. Разработка и аттестация специализированного расчётного кода для прогнозирования возникновения гидроударов в оборудовании АЭС;* рук. В.И. Мелихов; исполн.: С.Е. Якуш, А.А. Неровнов, Н.А. Ртищев, Г.Ю. Волков, А.Ш. Исхаков, Е.В. Вилюра. — *Электрогорск, 2018. — 182 с.*

7. *Разработка и аттестация специализированного расчётного кода для прогнозирования возникновения гидроударов в оборудовании АЭС. Итоговый отчет о НИР;* рук. В.И. Мелихов; исполн.: С.Е. Якуш, А.А. Неровнов, Н.А. Ртищев, Г.Ю. Волков, А.Ш. Исхаков, Е.В. Вилюра. — *Электрогорск, 2018. — 105 с.*

## **Экспериментальное и расчетное обоснование максимальной длительности автономной работы (72 часа) систем ГЕ-2, ГЕ-3 и СПОТ при ЗПА с аварийными течами из первого контура**

*Руководитель работы: д-р техн. наук В.И. Мелихов*

*Исполнители: главный научный сотрудник, д-р техн. наук И.В. Елкин, старший научный сотрудник А.В. Капустин, старший научный сотрудник А.А. Неровнов, специалист 1-й категории А.Ш. Исхаков, главный инженер С.М. Никонов, начальник конструкторско-технологического отдела А.В. Столпник, главный специалист А.В. Басов*

Данное исследование выполнено в рамках работ по обоснованию проекта ВВЭР-ТОИ. РУ ВВЭР-ТОИ имеет системы безопасности, построенные на разных принципах действия (пассивном и активном). Система безопас-

ности должна обеспечивать выполнение функций безопасности в течение не менее 72 часов, включая работу в режимах с полным обесточиванием.

Для выполнения данного условия в составе имеются пассивные системы: ГЕ-1, ГЕ-2, ГЕ-3 и СПОТ ПГ. Системы ГЕ должны поддерживать необходимый уровень теплоносителя в корпусе реактора, отводить газы из объема трубочатки парогенераторов, а система СПОТ ПГ — отводить тепло, обусловленное остаточным тепловыделением в активной зоне реактора. Выполнение требования обеспечения автономности АЭС в течение 72 часов (учет результатов анализа аварии на АЭС Фукусима) осуществляется с помощью новой системы безопасности ГЕ-3.

Цель данной работы — подтверждение требования НП-001-15 «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» в части реализации глубокоэшелонированной защиты, основанной на применении систем ГЕ-1, ГЕ-2, ГЕ-3 и СПОТ при ЗПА с аварийными течами из первого контура.

В ходе работ по договору была разработана и обоснована номенклатура экспериментальных исследований (матрица экспериментов), которые необходимо выполнить на крупномасштабном стенде безопасности ПСБ-ВВЭР для достижения цели данной работы. Эта номенклатура была согласована с РНЦ «Курчатовский институт», ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Атомэнергопроект. Номенклатура основана на 4-х сценариях развития аварий на ВВЭР-ТОИ:

- потеря всех источников переменного тока и, соответственно, неработоспособность всех активных систем безопасности на 72 часа, отказ на запуск всех дизель генераторов; аварийное питание осуществляется от аккумуляторных батарей;
- малая течь теплоносителя из трубопровода системы ГЕ САОЗ, эквивалентным диаметром Ду 65 мм с одновременной потерей всех источников переменного тока, включая дизель-генераторы на 72 часа;
- малая течь теплоносителя из «холодной» нитки ГЦТ эквивалентным диаметром Ду 65 мм с одновременной потерей всех источников переменного тока, включая дизель-генераторы на 72 часа;
- разрыв ГЦТ Ду 850 мм на выходе из реактора с одновременной потерей всех источников переменного тока, включая дизель-генераторы на 72 часа.

Для выполнения экспериментальных исследований сценарии этих аварий (хронологическая последовательность событий) были адаптированы к возможностям и ограничениям стенда ПСБ-ВВЭР. Для этого был выполнен большой объем расчетных работ, включающих: расчеты аварийных режимов реакторной установки (силами сотрудников РНЦ «Курчатовский институт») и претестовые расчеты соответствующих экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР (силами сотрудников ЭНИЦ). В качестве расчетного инструмента использовался код RELAP5/MOD3. В результате проделанной работы были разработаны сценарии экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР, в которых

будут воспроизводиться нестационарные теплогидравлические процессы и явления, реализующиеся в аварийных режимах реакторной установки ВВЭР-ТОИ.

Для учета конструктивных особенностей проекта ВВЭР-ТОИ и специфики указанных выше экспериментов было разработано техническое задание на реконструкцию (модернизацию) стенда ПСБ-ВВЭР и его оборудования, в соответствии с которым был разработан рабочий проект по изменению систем и элементов стенда ПСБ-ВВЭР.

Согласно рабочего проекта выполнена модернизация следующих систем стенда ПСБ-ВВЭР:

- система гидроемкостей второй и третьей ступени;
- система имитации малых течей;
- система пассивного отвода тепла от парогенераторов;
- система имитации защитной оболочки;
- система компенсации тепловых потерь;
- система имитации активной зоны (сборка имитаторов твэл);
- система подачи газа;
- системы АСНИ и СКУ стенда.

Элементы перечисленных систем были изготовлены (или модернизированы) и выполнен их монтаж. После завершения монтажа были выполнены пуско-наладочные работы.

На модернизированном стенде ПСБ-ВВЭР было выполнено четыре намеченных эксперимента. Каждый эксперимент был выполнен в соответствии с ранее разработанным сценарием, при этом тренды поведения основных теплофизических параметров в экспериментах соответствовали полученным в претестовых расчетах. Анализ результатов проведенных экспериментов и результатов ранее выполненных расчетов в поддержку экспериментальных исследований показал, что совместная работа пассивных систем безопасности (ГЕ-1, ГЕ-2, ГЕ-3 и СПОТ) обеспечивает надежное расхолаживание в течение трех суток. Требование автономности для головного блока Курской АЭС-2 (проект ВВЭР-ТОИ) в течение 72 часов выполняется. Выполнение требований НП-001-15 «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» в части реализации глубокоэшелонированной защиты, основанной на применении систем ГЕ-1, ГЕ-2, ГЕ-3 и СПОТ при ЗПА с течами из первого контура, подтверждено.

Проведенный анализ показал, что совместная работа пассивных систем позволила не допустить превышение критерия безопасности в части температуры оболочки твэл в течение 72 часов. Это позволяет сделать заключение об автономности АЭС с обеспечением выполнения функций безопасности.

Выполненные экспериментальные исследования дополнили базу данных для обоснования автономной работы (72 часа) АЭС с РУ ВВЭР-ТОИ при

совместной работе пассивных систем ГЕ-1, ГЕ-2, ГЕ-3, СПОТ и при ЗПА с течами из первого контура.

1. Номенклатура экспериментальных исследований. Экспериментальное и расчетное обоснование максимальной длительности автономной работы (72 часа) систем ГЕ-2, ГЕ-3 и СПОТ при ЗПА с аварийными течами из первого контура. Обоснование и согласование Номенклатуры экспериментальных исследований. ТОI-НIOKR-MDE0001, Ревизия А03. Руководитель работы В.И. Мелихов, исполнители: И.В. Елкин, А.В. Капустин, А.А. Неровнов. АО «ЭНИЦ», 2018 г., 75 с.
2. Отчет о НИР. Расчетный анализ в поддержку экспериментальных исследований. Адаптация сценариев экспериментов. ТОI-НIOKR-MDD0122, Ревизия А01. Руководитель работы В.И. Мелихов, исполнители: И.В. Елкин, А.В. Капустин, А.А. Неровнов, А.Ш. Исхаков. АО «ЭНИЦ», 2017 г., 237 с.
3. Стенд ПСБ-ВВЭР. Программа экспериментов ПСБ ВВЭР.357.00.00.30.П. ТОI-НIOKR-MDC0008. Руководитель работы В.И. Мелихов, исполнители: И.В. Елкин, А.В. Капустин, А.А. Неровнов. АО «ЭНИЦ», 2018 г., 94 с.
4. Технические требования к экспериментальному стенду для выполнения Программы экспериментов. ТОI-НIOKR-MEC0016, Ревизия А02. Руководитель работы В.И. Мелихов, исполнители: И.В. Елкин, А.В. Капустин, А.А. Неровнов. АО «ЭНИЦ», 2018 г., 50 с.
5. Пояснительная записка. Технические решения (Рабочий проект) по изменению систем и элементов существующего или создания нового стенда, соответствующего техническим требованиям для выполнения Программы экспериментов. ТОI-НIOKR-MDB0003, Ревизия А01. Руководитель работы В.И. Мелихов, исполнители: И.В. Елкин, С.М. Никонов, А.В. Столпник. АО «ЭНИЦ», 2018 г., 884 с.
6. Отчет о патентных исследованиях. Экспериментальное и расчетное обоснование максимальной длительности автономной работы (72 часа) систем ГЕ-2, ГЕ-3 и СПОТ при ЗПА с аварийными течами из первого контура. Разработка Технических решений (Рабочего проекта) по изменению систем и элементов существующего или создания нового стенда, соответствующего техническим требованиям для выполнения Программы экспериментов. Проведение патентных исследований и представление отчета об их проведении. ТОI-НIOKR-MDD0121, Ревизия А01. Руководитель работы В.И. Мелихов, исполнители: И.В. Елкин, А.В. Капустин, А.А. Неровнов, А.Ш. Исхаков. АО «ЭНИЦ», 2018 г., 55 с.
7. Отчет. Готовность экспериментального стенда к выполнению программы экспериментов. ТОI-НIOKR-MDD0126, Ревизия А01. Руководитель работы В.И. Мелихов, исполнители: И.В. Елкин, С.М. Никонов, А.В. Столпник. АО «ЭНИЦ», 2018 г., 194 с.
8. Отчет о проведенных экспериментах. ТОI-НIOKR-MDD0127, Ревизия А01. Руководитель работы В.И. Мелихов, исполнители: И.В. Елкин, А.В. Басов. АО «ЭНИЦ», 2018 г., 161 с.
9. Итоговый отчет. «Экспериментальное и расчетное обоснование максимальной длительности автономной работы (72 часа) систем ГЕ-2, ГЕ-3 и СПОТ при ЗПА с аварийными течами из первого контура». ТОI-НIOKR-MDD0128, Ревизия А01. Руководитель работы В.И. Мелихов, исполнители: И.В. Елкин, А.В. Капустин, А.А. Неровнов, А.Ш. Исхаков. АО «ЭНИЦ», 2018 г., 55 с.

## **Экспериментальное обоснование методики измерения расхода однофазной среды при стабилизированном и нестабилизированном течении в круглых трубах. Аттестация методики в органах Росстандарта**

*Руководитель работы: Б.М. Корольков*

*Исполнители: д-р техн. наук Э.А. Болтенко, канд. техн. наук М.В. Давыдов, И.В. Кононенко, О.Е. Костюков, Г.А. Климова, А.Ф. Фомицкий*

В работе представлены исследования, направленные на разработку и экспериментальное обоснование методики определения расхода однофазной среды при стабилизированном течении. Методика основана на измерении скоростей в двух точках по сечению трубы и определении расхода среды по результатам этих измерений. Базируется на закономерностях турбулентного течения в круглых трубах, согласно которой осесимметричный профиль скорости может быть описан с помощью универсальной логарифмической зависимости вида  $v = A \ln(y/r) + B$ .

Выполнена экспериментальная проверка методики определения расхода при стабилизированном течении. Проверка осуществлялась на основе данных И. Никурадзе и данных АО «ЭНИЦ», полученных на установке УПВГХ-100.

Скорость воды в опытах определялась с помощью напорных трубок, расположенных перпендикулярно исследуемому потоку. Опыты проводились на трубе  $D_y = 98$  мм. Число  $Re$  изменялось в диапазоне  $1 \times 10^5 - 5,9 \times 10^5$ .

Погрешность измерения для гидродинамически гладких труб не превышала 1%. Для шероховатых труб максимальная погрешность составила 2%.

Разработана методика определения расхода однофазной среды для случая течения в круглых трубах после одиночногогиба трубопровода, основанная на измерении скоростей в трех точках по сечению трубы и определении расхода среды  $Q$  по результатам этих измерений.

Получено свидетельство на методику выполнения измерений по скоростям в нескольких точках сечения трубы (разработана АО «ЭНИЦ» и ФГУП «ВНИИР»).

ЗАРЕГИСТРИРОВАНА ФГУП «ВНИИМС». Регистрационный номер №0100257-2013 в информационном фонде по обеспечению единства измерений.

Свидетельство об аттестации методики (метода) измерений №0100257-2013.

*Экспериментальное обоснование методики измерения расхода однофазной среды при стабилизированном и нестабилизированном течении в круглых трубах / 2018 г. исполн.: Э.А. Болтенко, Б.М. Корольков, М.В. Давыдов, И.В. Кононенко, О.Е. Костюков, Г.А. Климова, А.Ф. Фомицкий — Электрогорск, 2018. — 111 с.*

## **Приёмка, хранение и эксплуатация огнестойких турбинных масел. Сбор, накопление и утилизация отработанных масел. Типовая инструкция**

*Руководитель работы канд. хим. наук Л.А. Галимова*

Типовая инструкция разработана с целью установления единых требований к:

- приемке и хранению синтетических огнестойких масел на АЭС;
- эксплуатации синтетических огнестойких масел в маслосистемах оборудования;
- обеспечению промышленной чистоты маслосистем оборудования при эксплуатации синтетических огнестойких масел;
- безопасности при применении синтетических огнестойких масел на атомных станциях;
- накоплению и подготовке к утилизации отработанных огнестойких, нефтяных турбинных и трансформаторных масел на АЭС.

Требования инструкции распространяются на действующие АЭС:

1) эксплуатирующие огнестойкие масла (огнестойкие гидравлические жидкости) на основе триксиленилфосфатов в маслосистемах оборудования, в том числе:

а) системах смазки подшипников и гидроподъёма роторов турбоагрегатов;

б) системах регулирования и защиты турбоагрегатов;

в) системах вспомогательного оборудования турбоагрегатов;

г) маслосистемах ГЦН(А) для обеспечения маслом и охлаждения подшипников электродвигателя насоса, верхнего подшипникового узла насоса, а также в маслоснабжении торцевого уплотнения вала насоса;

д) объединенной маслосистеме, включающей системы смазки, уплотнения вала генератора, регулирования и защиты, гидроподъема роторов турбоагрегатов;

2) в результате производственной деятельности которых образуются отработанные огнестойкие, нефтяные турбинные и трансформаторные масла в части установления требований при их накоплении на площадке АЭС и сдаче на утилизацию.

*ТИ 1.1.3.01.1211-2017 Приёмка, хранение и эксплуатация огнестойких турбинных масел. Сбор, накопление и утилизация отработанных масел. Типовая инструкция. Приказ АО «Концерн Росэнергоатом» о введении в действие ТИ 1.1.3.01.1211-2017 от 05.06.2017 № 9/733-П / АО «ЭНИЦ»; рук. Л.А. Галимова. – Электрогорск, 2017. – 100 с.*

## **Разработка и выполнение Плана мероприятий по эксплуатации огнестойких жидкостей на АЭС**

*Руководитель работы канд. хим. наук Л.А. Галимова;*

*исполнитель: ведущий инженер С.О. Гончарова*

План мероприятий по эксплуатации огнестойких жидкостей на АЭС разработан в соответствии с пунктом 6.1 Решения совещания главных инженеров АЭС № 91, утверждённого приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 21.03.2018 № 9/342-П, с целью повышения уровня организации эксплуатации и химического контроля огнестойких жидкостей, применяемых в маслосистемах основного и вспомогательного оборудования АЭС. Действие Плана мероприятий распространяется на атомные станции, эксплуатирующие огнестойкие жидкости, а именно:

- Белоярскую АЭС (энергоблок № 4);
- Калининскую АЭС (энергоблоки № 3, 4);
- Кольскую АЭС (объединенная маслосистема ТА-6);
- Ленинградскую АЭС-2 (энергоблоки № 1, 2);
- Нововоронежскую АЭС-2 (энергоблоки № 1, 2);
- Курскую АЭС-2.

В соответствии с Планом мероприятий и с учетом положительного опыта применения огнестойких жидкостей в системах регулирования турбин на АЭС ЭДФ разработаны новые подходы к организации эксплуатации огнестойких жидкостей в маслосистемах смазки и регулирования турбин, регулирования БРУ-К, маслосистемах главных питательных насосов на российских АЭС, в том числе:

- оснащение штатных фильтров тонкой очистки маслосистем фильтроэлементами с тонкостью фильтрации 5–6 мкм для систем регулирования турбин и БРУ-К, 12 мкм для систем смазки подшипников турбин и ПЭН;
- организация комплексной очистки эксплуатационных огнестойких жидкостей с применением технологий вакуумной осушки, тонкой фильтрации и ионообменной фильтрации;
- организация химического контроля качественного состояния эксплуатационных огнестойких жидкостей с внедрением и применением новых методов испытаний, в том числе кулонометрического метода контроля влагосодержания по Фишеру, колориметрии осадка на мембранных фильтрах для оценки степени деградации огнестойких жидкостей.

*План мероприятий по эксплуатации огнестойких жидкостей (огнестойких масел) на АЭС. Приказ АО «Концерн Росэнергоатом» об утверждении и введении в действие Плана мероприятий по эксплуатации огнестойких жидкостей на АЭС от 12.12.2018 № 9/1749-П / АО «ЭНИЦ»; рук. Л.А. Галимова; исполн.: С.О. Гончарова. – Электрогорск, 2018. – 14 с.*

## **Проведение лабораторных испытаний по влиянию физико-химических характеристик эксплуатационных огнестойких масел на условия определения растворенного шлама в пробах масел на АЭС. Разработка методики измерений массовой доли растворенного шлама в синтетических огнестойких турбинных маслах на основе триарилфосфатов, применяемых в маслосистемах турбинного и насосного оборудования АЭС**

*Руководитель работы канд. хим. наук Л.А. Галимова*

Целью работы является повышение эффективности химического контроля при эксплуатации огнестойких масел в оборудовании АЭС в части совершенствования методов испытаний, оптимизации и унификации условий определения растворенного шлама в огнестойких маслах для оценки их эксплуатационного ресурса и степени деградации.

Анализ условий проведения испытаний и результатов измерений массовой доли растворенного шлама в пробах огнестойких масел из маслосистем турбинного оборудования АЭС, выполненный на основании данных опросных листов и оперативной информации, поступающей с действующих энергоблоков АЭС, указывает на низкую эффективность организации контроля содержания растворенных продуктов деградации синтетического масла с применением методики согласно приложению Л.8 РД ЭО 1.1.2.05.0444-2016 «Требования к эксплуатации, организации и проведению испытаний трансформаторных и турбинных масел на атомных станциях», а именно:

- низкая сходимоть полученных результатов измерений;
- несоответствие установленных методикой измерений метрологических характеристик со значениями погрешности результатов измерений и ее составляющих при выполнении анализов;
- отсутствие закономерности между результатами измерений и качественным состоянием эксплуатационного масла.

По итогам работы, выполненной АО «ЭНИЦ» на базе водной радиохимической лаборатории химцеха Нововоронежской АЭС:

- разработаны параметры проведения испытаний и условия применения метода колориметрии осадка на мембранных фильтрах для определения показателя потенциала лакообразования, характеризующего содержание растворенного шлама и степень деградации эксплуатационных огнестойких масел;
- внесены изменения в нормативно-технические документы АО «Концерн Росэнергоатом» в части установления требований по применению метода колориметрии осадка на мембранном фильтре для контроля загрязненности эксплуатационных огнестойких масел продуктами деградации (приказ АО «Концерн Росэнергоатом» «Об утверждении

и введении в действие Изменения № 1 к РД ЭО 1.1.2.05.0444-2016» от 19.08.2019 № 9/1141-П).

*Проведение лабораторных испытаний по влиянию физико-химических характеристик эксплуатационных огнестойких масел на условия определения растворенного шлама в пробах масел на АЭС. Разработка методики измерений массовой доли растворенного шлама в синтетических огнестойких турбинных маслах на основе триарилфосфатов, применяемых в маслосистемах турбинного и насосного оборудования АЭС. Технический отчет по договору № 2010590016/Б2018/49/2018-КА от 09.08.2018. Заказчик – Технологический филиал АО «Концерн Росэнергоатом» / АО «ЭНИЦ»; рук. Л.А. Галимова. – Электрогорск, 2018. – 96 с.*

**Создание нормативно-технической документации по управлению старением электротехнического оборудования и контрольно-измерительных приборов и автоматики энергоблоков атомных станций на всех этапах жизненного цикла по теме: «Положение по управлению физическим старением контрольно-измерительных приборов и автоматики атомных станций. Положение по управлению физическим старением электротехнического оборудования атомных станций»**

*Руководитель проекта: А.В. Звонарев*

*Исполнители: руководитель НИР, заместитель директора АО «ЭНИЦ» по научной работе - начальник Управления НИР и НИОКР в области теплофизики В.Д. Локтионов; начальник отдела экспериментального подтверждения ресурсных характеристик Ю.А. Серебренников; начальник отдела разработки нормативно-технической документации Д.В. Богомолов; начальник отдела аналитического и методического обеспечения Т.Ю. Афанасьева; главный специалист Л.Ю. Серебренникова*

Представлены результаты разработки нормативных положений для включения в проекты национальных стандартов по управлению старением электротехнического оборудования и контрольно-измерительных приборов и автоматики (далее – КИПиА) энергоблоков атомных станций с реакторной установкой типа ВВЭР-1200 на всех этапах жизненного цикла (от проектирования до вывода из эксплуатации) с учетом нормативных рекомендаций МАГАТЭ и действующих нормативных документов РФ в области использования атомной энергии, действующих федеральных норм и правил в области использования атомной энергии и документов по стандартизации, обязательных к применению на территории Российской Федерации, в части управления старением и ресурсом элементов энергоблоков атомных станций.

Нормативные положения для включения в проекты национальных стандартов по управлению старением электротехнического оборудования

и КИПиА разработаны на основе опыта выполнения работ по управлению ресурсом элементов электротехнического оборудования и КИПиА, с учетом результатов сравнительного анализа документов МАГАТЭ и действующих федеральных норм и правил в области использования атомной энергии и документов по стандартизации, обязательных к применению на территории Российской Федерации, в части управления старением и ресурсом элементов энергоблоков атомных станций. Планируется использование разработанных нормативных положений в проекте национального стандарта в области управления физическим старением КИПиА атомных станций на следующем этапе выполнения НИР<sup>1</sup>.

*«Создание нормативно-технической документации по управлению старением электротехнического оборудования и контрольно-измерительных приборов и автоматики энергоблоков атомных станций на всех этапах жизненного цикла по теме: «Положение по управлению физическим старением контрольно-измерительных приборов и автоматики атомных станций. Положение по управлению физическим старением электротехнического оборудования атомных станций» Отчет о НИР/АО «ЭНИЦ» рук. А.В. Звонарев, В.Д. Локтионов; исполн.: Ю.А. Серебренников, Д.В. Богомолов, Т.Ю. Афанасьева, Л.Ю. Серебренникова. — Электрогорск, 2020 — 46 с. — Инв. № 184.844.*

## **Маслоочистительное оборудование для комплексной очистки огнестойких жидкостей на атомных станциях. Технические требования**

*Руководитель работы канд. хим. наук Л.А. Галимова;  
исполнитель: ведущий инженер С.О. Гончарова*

Целью работы является разработка типовых технических требований к маслоочистительному оборудованию для очистки, осушки и снижения и/или поддержания кислотного числа эксплуатационных огнестойких жидкостей в процессе эксплуатации в маслосистеме, а также при подготовке к подаче в оборудование с применением технологий тонкой фильтрации, вакуумной осушки и ионообменной фильтрации.

Область применения маслоочистительного оборудования для комплексной очистки огнестойких жидкостей включает:

- маслосистемы турбинного и вспомогательного насосного оборудования АЭС, включая систему смазки подшипников турбины, систему

---

<sup>1</sup> На основе разработанных нормативных положений в 2021 году разработан проект национального стандарта в области управления физическим старением КИПиА атомных станций в рамках выполнения НИР по теме «Разработка методологии управления старением, в том числе нормативно-технической и методической документации, необходимой для разработки программ по управлению старением КИПиА АЭС».

автоматического регулирования и защиты турбины, систему регулирования БРУ-К, систему смазки подшипников питательных насосных агрегатов, в которых в качестве гидравлических жидкостей и смазочных материалов применяется огнестойкая жидкость.

Нормативно-технический документ устанавливает технические требования к модулям тонкой фильтрации, вакуумной осушки и ионообменной фильтрации установки, а также к конструкции, прочности, безопасности, к используемым материалам, контрольно-измерительным приборам и автоматике, требования по ремонтпригодности и предоставляемой документации, другие специальные требования.

*ТТР 1.1.3.13.1676-2019 Маслоочистительное оборудование для комплексной очистки огнестойких жидкостей на атомных станциях. Технические требования. Приказ АО «Концерн Росэнергоатом» о введении в действие ТТР 1.1.3.13.1676-2019 от 13.01.2020 № 9/01/9-П / АО «ЭНИЦ»; рук. Л.А. Галимова; исполн.: С.О. Гончарова. – Электрогорск, 2020. – 50 с.*

## **Датчики влагосодержания для мониторинга качества огнестойких жидкостей в маслосистемах оборудования атомных станций. Технические требования**

*Руководитель работы канд. хим. наук Л.А. Галимова;  
исполнитель: ведущий инженер С.О. Гончарова*

Технические требования на датчики влагосодержания огнестойких жидкостей в маслосистемах оборудования разработаны с целью:

- обеспечения поставки на АЭС датчиков влагосодержания установленного качества, соответствующих требованиям безопасности, надежности и конкурентоспособности по техническим, экономическим и эксплуатационным показателям;
- унификации требований при поставке и применении датчиков влагосодержания для мониторинга качественного состояния рабочих жидкостей в маслосистемах основного и вспомогательного оборудования для проектируемых, сооружаемых и эксплуатируемых энергоблоков АЭС, применяющих огнестойкую жидкость.

Датчики влагосодержания огнестойких жидкостей в маслосистемах оборудования предназначены для организации непрерывного мониторинга изменения величины влагосодержания в огнестойких

Нормативно-технический документ устанавливает требования к:

- функциональным, техническим и метрологическим характеристикам;
- конструкции, прочности и безопасности;
- материалам и комплектности;

- электрооборудованию;
- условиям хранения, транспортирования, ремонта;
- предоставляемой информации и документации;
- сертификации;
- маркировке;
- приемке и методам контроля;
- другим показателям, связанным с определением соответствия продукции потребностям АЭС.

*ТТР 1.1.3.13.1671-2019 Датчики влагосодержания для мониторинга качества огнестойких жидкостей в маслосистемах оборудования атомных станций. Технические требования. Приказ АО «Концерн Росэнергоатом» о введении в действие ТТР 1.1.3.13.1671-2019 от 27.12.2019 № 9/2008-П / АО «ЭНИЦ»; рук. Л.А. Галимова; исполн.: С.О. Гончарова. — Электрогорск, 2020. — 29 с.*

### **Разработка методологии управления старением, в том числе нормативно-технической и методической документации, необходимой для разработки программ по управлению старением КИПиА АЭС**

*Руководитель проекта: А.В. Звонарев*

*Отв. исполн. начальник отдела разработки нормативно-технической документации Д.В. Богомолов; исполн.: начальник отдела*

*экспериментального подтверждения ресурсных характеристик*

*Ю.А. Серебренников; начальник отдела аналитического и методического обеспечения Т.Ю. Афанасьева; главный специалист А.В. Басов; главный специалист ЛЮ. Серебренникова*

Представлена работа по формированию методологии управления старением, в том числе нормативно-технической и методической документации, необходимой для разработки программ по управлению старением контрольно-измерительных приборов и автоматики (далее — КИПиА) атомных станций, в результате которой выполнено следующее:

- разработано техническое задание на разработку национального стандарта в области управления старением КИП и А атомных станций;
- разработан проект национального стандарта в области управления физическим старением КИПиА атомных станций;
- разработан проект методических указаний по управлению моральным старением КИПиА атомных станций;
- проведен анализ существующих результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области исследования механизмов старения и деградации КИПиА, обеспечивающих безопасную эксплуатацию АЭС;

- осуществлен выбор и подготовка представительных образцов КИПиА АЭС для проведения исследований и определение наиболее вероятных механизмов деградации в зависимости от условий и режимов эксплуатации КИПиА на российских АЭС;
- разработана программа и методика исследования механизмов старения образцов КИПиА входящих в состав систем, важных для безопасности реакторной установки ВВЭР-1200;
- проведены исследования механизмов старения образцов КИПиА под внешними воздействующими факторами после их эксплуатации на АЭС, определены модели старения.

*«Разработка методологии управления старением, в том числе нормативно-технической и методической документации, необходимой для разработки программ по управлению старением КИПиА АЭС по теме: «Разработка технических заданий на разработку национальных стандартов в области управления старением КСК АЭС. Подготовка к проведению исследований: этап 1 (промежуточный)» / рук. А.В. Звонарев; исполн.: А.В. Звонарев, Д.В. Богомолов, Ю.А. Серебренников, Т.Ю. Афанасьева, А.В. Басов, Л.Ю. Серебренникова. — Электрогорск, 2021 — 127 стр. — Инв. № 184.845.*

*«Разработка методологии управления старением, в том числе нормативно-технической и методической документации, необходимой для разработки программ по управлению старением КИПиА АЭС» по теме: «Разработка проектов национальных стандартов. Проведение исследований и испытаний: этап 2 (окончательный)» / рук. А.В. Звонарев; исполн.: Д.В. Богомолов, Ю.А. Серебренников, Т.Ю. Афанасьева, А.В. Басов, Л.Ю. Серебренникова. — Электрогорск, 2021 — 141 с. — Инв. № 184.846.*

## **Экспериментальная программа на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР в рамках проекта АЯЭ ОЭСР “ETHARINUS”. Эксперимент №1 «Несимметричная естественная циркуляция»: описание модернизации стенда ПСБ-ВВЭР для реализации проекта “ETHARINUS”, программа и методика эксперимента**

*Руководитель проекта: канд. техн. наук В.Д. Локтионов*

*Исполнители: ведущий научный сотрудник, д-р техн. наук И.В. Елкин; старший научный сотрудник, канд. техн. наук М.В. Давыдов; главный специалист А.В. Басов; начальник отдела нестандартных теплотехнических измерений, д-р техн. наук Э.А. Болтенко; начальник конструкторско-технологического отдела А.В. Столпник; ведущий инженер-конструктор О.Н. Трубкин; эксперт О.Л. Лазарев; главный специалист К.В. Соколов*

В отчете представлены описания новых и модернизированных систем стенда ПСБ-ВВЭР в конфигурации, предназначенной для выполнения

экспериментальной программы исследований в рамках международного проекта OECD/NEA “ETHARINUS” Project.

Основной целью проекта OECD/NEA “ETHARINUS” является дополнение существующих экспериментальных исследований и данных, полученных ранее при выполнении проекта PKL4 OECD/NEA (PKL—экспериментальная установка Primarkreislauf-Versuchsanlage, Framatome GmbH, Германия), по охлаждению активной зоны РУ в условиях естественной циркуляции теплоносителя и множественных разрывах трубчатки парогенераторов. Также, в рамках проекта OECD/NEA “ETHARINUS” планируется исследовать эффективность систем пассивного отвода тепла, используемых в существующих и в новых проектах энергетических РУ на водном теплоносителе.

Экспериментальные исследования в данном проекте будут выполняться на нескольких экспериментальных установках: PKL (Framatome GmbH, Германия), PWR-PACTEL (Lappeenranta University of Technology, Финляндия), и полномасштабном интегральном теплогидравлическом стенде ПСБ-ВВЭР (Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций, Россия).

Основной целью исследований на установке ПСБ-ВВЭР является поддержка работ по валидации и верификации расчетных инструментов и методик, применяемых для разработки систем пассивного отвода тепла в отечественных РУ ВВЭР. В частности, в экспериментальных исследованиях будут изучаться явления при асимметричной естественной циркуляции в различных аварийных условиях в РУ ВВЭР.

Программа планируемых исследований на установке ПСБ-ВВЭР состоит из четырех типов экспериментов:

- несимметричная естественная циркуляция;
- закрытие БЗОК при естественной циркуляции теплоносителя первого контура;
- авария с потерей теплоотвода от первого контура в состоянии холодного останова;
- расхолаживание реакторной установки в условиях несимметричной естественной циркуляции.

На основании претестовых расчетов, выполненных специалистами АО ОКБ «Гидропресс» с помощью расчетного кода ПК КОРСАР/ГП и специалистами АО ЭНИЦ – с помощью кода RELAP, были определены и представлены в отчете диапазоны работы первичных датчиков измерения экспериментальных параметров на полномасштабном интегральном стенде ПСБ-ВВЭР (перепады давления, температуры и др.) при выполнении эксперимента №1 «Несимметричная естественная циркуляция»: описание модернизации стенда. Также, в отчете представлены программа и методика

выполнения эксперимента №1 на стенде ПСБ-ВВЭР в рамках реализации экспериментальной части исследований.

*Экспериментальная программа на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР в рамках проекта АЯЭ ОЭСР “ETHARINUS”. Эксперимент №1 «Несимметричная естественная циркуляция»: описание модернизации стенда ПСБ-ВВЭР для реализации проекта “ETHARINUS”, программа и методика эксперимента / рук. В.Д. Локтионов; исполн.: И.В. Елкин, М.В. Давыдов, А.В. Басов, Э.А. Болтенко, А.В. Столпник, О.Н. Трубкин, О.Л. Лазарев, К.В. Соколов. — Электрогорск, 2021 — 110 с. — Инв. № 110.847.*

**Экспериментальная программа на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР в рамках проекта АЯЭ ОЭСР “ETHARINUS”. Эксперимент №1 «Несимметричная естественная циркуляция»: претестовый расчет кодом RELAP5/SCDAPMod3.2**

*Руководитель проекта: канд. техн. наук В.Д. Локтионов*

*Исполнители: старший научный сотрудник, канд. техн. наук М.В. Давыдов*

Отчет содержит результаты претестовых расчетов кодом RELAP5/SCDAP Mod3.2 Эксперимента №1, который планируется к выполнению на интегральном теплогидравлическом стенде ПСБ-ВВЭР (АО «ЭНИЦ», г. Электрогорск) в рамках выполнения экспериментальной части исследований международного проекта OECD/NEA “ETHARINUS”. Численное моделирование выполнено для двух сценариев выполнения эксперимента. Также, в отчете представлены результаты исследования чувствительности основных параметров Эксперимента №1 к уровню котловой воды в одном из парогенераторов стенда.

Целью экспериментальных исследований на установке ПСБ-ВВЭР является параметрическое изучение ассиметричной естественной циркуляции при различных условиях протекания аварии в РУ ВВЭР. При реализации Эксперимента №1 будет выполняться исследование динамики изменения расходов естественной циркуляции в петлях первого контура установки ПСБ-ВВЭР при различном уровне отводимой мощности через один из ПГ, вплоть до полного прекращения отвода тепла через этот ПГ.

Претестовое моделирование Эксперимента №1 выполнялось в первом случае (т.н. «Базовый» вариант) с использованием имеющегося набора исходных данных для расчетного кода RELAP5/SCDAP, разработанного в АО «ЭНИЦ» в 2000-х годах. Во втором расчетном случае были уменьшены величины коэффициентов теплоотдачи со всех внешних поверхностей стенда таким образом, чтобы смоделировать расчетный случай отсутствия тепловых потерь (идеальная теплоизоляция).

Результаты моделирования показали, что в случае «идеальной тепловой изоляции» стенда, в ходе выполнения эксперимента, давление ни в одном из элементов второго контура стенда не достигает величины 13 МПа, а значения основных теплофизических параметров не выходят за допустимые эксплуатационные пределы стенда ПСБ-ВВЭР.

Дополнительно, были выполнены два варианта расчетов с измененным сценарием выполнения Эксперимента №1. В этих вариантах, после полного закрытия вентиля RA12S02 выполняется повторное пошаговое его открытие. Полученные результаты продемонстрировали, что при обратном ходе штока (повторном открытии) вентиля RA12S02 все системные параметры принимают значения, равные значениям при соответствующих положениях штока при прямом ходе (закрытии) вентиля.

В рамках исследования чувствительности результатов эксперимента к граничным условиям был выполнен также расчет с пониженным уровнем котловой воды в одном из объединенных по пару парогенераторов установки ПСБ-ВВЭР, а именно — в парогенераторе №1. Полученные результаты показали низкую чувствительность основных теплофизических параметров стенда к изменению данного параметра.

В результате выполненных численных расчетов были получены данные по поведению основных теплофизических параметров стенда ПСБ-ВВЭР в ходе выполнения Эксперимента №1 для различных вариантов и условий проведения эксперимента. Полученные результаты будут использованы для проверки/и коррекции сценария выполнения эксперимента и оценки диапазонов изменения теплофизических параметров в различных системах стенда ПСБ-ВВЭР в процессе реализации данного эксперимента.

*Экспериментальная программа на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР в рамках проекта АЯЭ ОЭСР “ETHARINUS”. Эксперимент №1 «Несимметричная естественная циркуляция»: претестовый расчет кодом RELAP5/SCDAP Mod3.2/рук. В.Д. Локтионов; исполн.: М.В. Давыдов. — Электрогорск, 2022 — 38 с. — Инв. № 110.848.*

**Экспериментальная программа на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР в рамках проекта АЯЭ ОЭСР “ETHARINUS”. Эксперимент №1 «Несимметричная естественная циркуляция». Предварительный анализ результатов**

*Руководитель проекта: канд. техн. наук В.Д. Локтионов*

*Исполнители: главный научный сотрудник, д-р техн. наук И.В. Елкин; ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук Г.И. Дрёмин; старший научный сотрудник, канд. техн. наук М.В. Давыдов; главный специалист А.В. Басов*

Отчет содержит краткий обзор и предварительный анализ результатов выполненного на интегральной теплогидравлической установке ПСБ-ВВЭР (АО «ЭНИЦ») эксперимента №1 по проекту OECD/NEA “ETHARINUS”.

Целью экспериментальных исследований на установке ПСБ-ВВЭР в рамках выполнения экспериментальной программы исследований проекта OECD/NEA “ETHARINUS” является параметрическое изучение протекания теплогидравлических процессов в условиях ассиметричной естественной циркуляции (ЕЦ). В частности, в ходе выполнения Эксперимента №1 планировалось исследование динамики изменения расходов теплоносителя в условиях ЕЦ в различных петлях первого контура установки ПСБ-ВВЭР при различной величине тепловой мощности, отводимой через один из парогенераторов, вплоть до полного прекращения отвода тепла через данный парогенератор.

В период с 19.09 по 23.09.2022 г. на установке ПСБ-ВВЭР был выполнен Эксперимент №1 в соответствии со сценарными условиями, разработанными АО ОКБ «Гидропресс». При подготовке и выполнении данного эксперимента были учтены требования и условия частного технического задания № 520-Пр-038, а также использовались результаты претестовых теплогидравлических расчетов, выполненных сотрудниками АО ОКБ «Гидропресс» и АО «ЭНИЦ».

Эксперимент №1 выполнялся в соответствии с разработанными методикой «Несимметричная естественная циркуляция» (ПСБ-ВВЭР.947.00.00.00.М) и программой выполнения эксперимента №1 «Несимметричная естественная циркуляция» (ПСБВВЭР.947.00.00.00.П).

Отчет содержит краткий обзор и предварительный анализ результатов, полученных при выполнении Эксперимента №1. Результаты выполненного эксперимента, в целом, подтвердили работоспособность систем и компонентов стенда ПСБ-ВВЭР, а также правильность выбранных методических подходов для выполнения данного эксперимента. Вместе с тем, анализ результатов выявил ряд проблем в функционировании ряда систем и элементов стенда, таких, как система подачи питательной воды в парогенераторы, система регулирования давления в первом контуре и некоторых других элементах установки ПСБ-ВВЭР. Полученные результаты позволили

уточнить ряд вопросов по методике выполнения эксперимента №1, которые необходимо будет учесть при реализации последующих экспериментов проекта OECD/NEA “ETHARINUS” на установке ПСБ-ВВЭР.

Опытные результаты, полученные при реализации эксперимента №1, позволят более обоснованно выполнить подготовку стенда ПСБ-ВВЭР для дальнейших экспериментальных исследований в рамках экспериментальной программы проекта “ETHARINUS”, а также, откорректировать методику проведения экспериментов на данной установке. Для подготовки к выполнению следующей группы экспериментов, запланированных к выполнению в рамках данного проекта, были разработаны и апробированы на стенде ПСБ-ВВЭР алгоритмы работы регулятора нагревателя КД в режиме поддержания давления в первом контуре, а также регулятора нагревателя питательной воды в режиме поддержания заданной температуры.

Полученные результаты могут представлять ценность для валидации/верификации расчетных средств, предназначенных для анализа теплогидравлических процессов как существующих, так и новых проектах РУ ВВЭР.

*Экспериментальная программа на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР в рамках проекта АЯЭ ОЭСР “ETHARINUS”. Эксперимент №1 «Несимметричная естественная циркуляция». Предварительный анализ результатов / рук. В.Д. Локтионов; исполн.: И.В. Елкин; Г.И. Дрёмин; М.В. Давыдов; А.В. Басов. — Электрогорск, 2022 — 36 с. — Инв. № 110.852.*

## **Экспериментальная программа на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР в рамках проекта АЯЭ ОЭСР “ETHARINUS”. Эксперимент №2 «Закрытие БЗОК при естественной циркуляции теплоносителя первого контура»: претестовый расчет кодом RELAP5 MOD3.2**

*Руководитель проекта: канд. техн. наук В.Д. Локтионов*

*Исполнитель: М.В. Давыдов*

Отчет содержит результаты претестовых расчетов кодом RELAP5 Mod3.2 Эксперимента №2 «Закрытие БЗОК при естественной циркуляции теплоносителя первого контура» проекта OECD/NEA “ETHARINUS”.

Целью экспериментальных исследований на интегральном теплогидравлическом стенде ПСБ-ВВЭР в рамках проекта OECD/NEA “ETHARINUS” является исследование динамики изменения расходов естественной циркуляции в различных петлях первого контура модели РУ ВВЭР при внесении быстрого возмущения. В качестве возмущений выступают последовательные закрытия моделей БЗОК, установленных на паропроводах второго контура экспериментальной установки. Отчет содержит описание расчетных инструментов, набора исходных данных и результатов претестового моделирования

Эксперимента №2 для двух различных сценариев выполнения эксперимента №2 на стенде ПСБ-ВВЭР.

«Базовый» вариант расчета был выполнен с использованием имеющегося набора исходных данных для стенда ПСБ-ВВЭР, разработанного в АО «ЭНИЦ» в 2000-х годах. В следующем варианте (Вариант №1) расчета были использованы скорректированные значения коэффициентов теплоотдачи на всех внешних поверхностях стенда (их значения были уменьшены таким образом, чтобы данный вариант можно было рассматривать как расчет без учета тепловых потерь – т.н. «идеальная теплоизоляция»). Результаты моделирования показали, что в рамках выбранного сценария выполнения эксперимента № 2 для успешной реализации эксперимента достаточно использовать малые линии для отвода пара из парогенераторов стенда ПСБ-ВВЭР. В обоих выполненных вариантах расчета было показано, что после отключения последнего работающего парогенератора (ПГ № 4 стенда ПСБ-ВВЭР), достаточно быстро достигается один из критериев прекращения эксперимента — температура на выходе из модели А3 стенда превышает значение равное 328 °С. В первом («базовом») случае это происходит через ~23 минуты после отсечения ПГ № 4, а во втором случае (Вариант № 1) — через 11 минут после отсечения данного парогенератора. При этом, было показано, что в случае дальнейшего продолжения (после достижения условий останова эксперимента) эксперимента, в течение интервала ~40...60 минут после отключения последнего работающего парогенератора, следует ожидать срыва естественной циркуляции теплоносителя во всех петлях первого контура стенда ПСБ-ВВЭР.

Также, для исследования чувствительности результатов эксперимента к граничным условиям были выполнены дополнительные претестовые расчеты. Так, один из таких пре-тестовых расчетов (Вариант №2) был выполнен для случая более высокого, по сравнению с «базовым» вариантом, начального уровня давления (3 МПа) во втором контуре стенда ПСБ-ВВЭР, а также были выполнены расчеты №3 и 4 в случае подачи в парогенераторы питательной воды с более высокой температурой, равной 130 и 164 °С, соответственно.

Анализ результатов моделирования показал, что, в целом, динамика изменений всех основных параметров стенда в течение эксперимента для вариантов расчета №№ 1-4 практически полностью совпадает с аналогичной для «базового» сценария претестового расчета. Увеличение начального уровня давления во втором контуре стенда ПСБ-ВВЭР привело к увеличению времени начала основных событий эксперимента (достижение предельных значений давления и температуры) на ~ 10–20 минут по сравнению с базовым вариантом расчета. Также, претестовые расчеты и полученные результаты показали низкую чувствительность основных экспериментальных параметров к изменению температуры питательной воды.

В результате выполненных расчетов были получены данные по поведению основных систем стенда ПСБ-ВВЭР и экспериментальных параметров в ходе выполнения Эксперимента №2 «Закрытие БЗОК при естественной циркуляции теплоносителя первого контура». Полученные результаты будут использованы для проверки/корректировки сценария выполнения эксперимента и оценки диапазонов изменения величин экспериментальных параметров стенда ПСБ-ВВЭР в процессе реализации эксперимента № 2 для настройки системы КИП и АСНИ данного стенда.

*Экспериментальная программа на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР в рамках проекта АЯЭ ОЭСР «ETHARINUS». Эксперимент №2 «Закрытие БЗОК при естественной циркуляции теплоносителя первого контура»: претестовый расчет кодом RELAP5 MOD3.2. /рук. В.Д. Локтионов; исполн. М.В. Давыдов. — Электрогорск, 2022 — 49 с. — Инв. № 110.850.*

### **Экспериментальная программа на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР в рамках проекта АЯЭ ОЭСР «ETHARINUS». Эксперимент №2 «Закрытие БЗОК при естественной циркуляции теплоносителя первого контура»: предварительный анализ результатов**

*Руководитель проекта: канд. техн. наук В.Д. Локтионов*

*Исполнители: главный научный сотрудник, д-р техн. наук И.В. Ёлкин, ведущий научный сотрудник Г.И. Дрёмин, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук М.В. Давыдов, старший научный сотрудник А.В. Басов*

В отчете представлен предварительный анализ результатов эксперимента №2 «Закрытие БЗОК при естественной циркуляции теплоносителя первого контура» по проекту АЯЭ ОЭСР «ETHARINUS», выполненного на интегральной теплогидравлической установке ПСБ-ВВЭР (АО «ЭНИЦ»). Данный эксперимент выполнялся в рамках экспериментальной части работ, выполняемых специалистами Российской Федерации по программе OECD/NEA «ETHARINUS».

Целью данного экспериментального исследования являлось параметрическое изучение теплогидравлических процессов в условиях асимметричной естественной циркуляции (ЕЦ) в РУ ВВЭР. В частности, одной из задач эксперимента №2 являлось исследование динамики изменения расходов естественной циркуляции в первом контуре реакторной установки при внесении быстрых возмущений. Источником возмущений при выполнении эксперимента являлось последовательное закрытие имитаторов БЗОК, установленных на паропроводах второго контура экспериментальной установки ПСБ-ВВЭР.

Эксперимент №2 был выполнен 30 ноября 2022 г. в соответствии с условиями и сценарием эксперимента, сформулированными в Частном техническом задании, разработанным специалистами АО ОКБ «Гидропресс». Для подготовки к эксперименту использовались результаты теплогидравлических претестовых расчетов, выполненных сотрудниками АО ОКБ «Гидропресс», а также результаты компьютерного моделирования, выполненного сотрудниками АО «ЭНИЦ». Эксперимент выполнялся в соответствии с разработанными методикой (ПСБ ВВЭР.947.00.00.01.М) и программой (ПСБ ВВЭР.947.00.00.01.П) экспериментальных исследований.

Отчет содержит предварительный анализ опытных результатов, полученных при выполнении эксперимента № 2. Результаты эксперимента показали хорошее согласие между экспериментальными данными и результатами претестовых расчетов, выполненных специалистами АО «ЭНИЦ» и АО ОКБ «Гидропресс» с помощью различных программных комплексов (КОРСАР/ГП, RELAP5 Mod3.2 и RELAP5 Mod3.3).

Полученные при реализации эксперимента № 2 результаты могут быть использованы для валидации/верификации расчетных средств, предназначенных для анализа теплогидравлических процессов в РУ ВВЭР в условиях их штатной работы и в аварийных условиях.

*Экспериментальная программа на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР в рамках проекта АЯЭ ОЭСР «ETHARINUS». Эксперимент №2 «Закрытие БЗОК при естественной циркуляции теплоносителя первого контура»: предварительный анализ результатов / рук. В.Д. Локтионов; исполн.: И.В. Ёлкин, М.В. Давыдов, А.В. Басов. — Электрогорск, 2022 — 40 с. — Инв. № 110.853.*

### **Программа и методика экспериментальных исследований, направленных на обоснование теплогидравлических схем ТВС, использующих тепловые и гидравлические обратные связи для повышения безопасности и энергонапряженности РУ ВВЭР**

*Руководитель проекта: д-р техн. наук Э.А. Болтенко*

*Исполнители: старший научный сотрудник, канд. техн. наук М.В. Давыдов; главный специалист А.В. Басов; специалист первой категории Г.Е. Новичков*

Настоящая Программа и Методика (ПМ) разработана применительно к экспериментальному обоснованию теплогидравлических схем ТВС, использующих тепловые и гидравлические обратные связи, для повышения безопасности и энергонапряженности РУ ВВЭР.

Экспериментальные исследования будут выполнены на одно и семи-стержневых электрообогреваемых моделях. В качестве имитаторов твэл используются электрообогреваемые трубчатые твэлы, в которых теплосъем

осуществляется с выпуклой и вогнутой поверхностями. Приведено описание одно и семистержневых электрообогреваемых моделей с трубчатыми твэлами.

Данная ПМ содержит краткое описание объекта исследований:

а) одностержневые модели ТВС с трубчатыми твэлами МТ1 — моделируют тепловые обратные связи между вогнутой и выпуклой теплоотдающими поверхностями твэл; МТК1 — моделируют тепловые обратные связи между вогнутой и выпуклой теплоотдающими поверхностями твэл с учетом наличия топлива между оболочками; МТГ1 — моделируют тепловые обратные связи между вогнутой и выпуклой теплоотдающими поверхностями и гидравлические обратные связи между внутритвэльным и межтвэльным пространством.

б) семистержневая модель ТВС со стержневыми твэлами МГ7 — моделируют гидравлические связи между ячейками ТВС.

в) семистержневая модель ТВС с трубчатыми твэлами МТ7 — моделирует тепловые обратные связи между вогнутой и выпуклой теплоотдающими поверхностями твэл и перераспределение тепла между ячейками; МТГ7 моделирует тепловые обратные связи между вогнутой и выпуклой теплоотдающими поверхностями твэл и гидравлические обратные связи между внутритвэльным и межтвэльным пространством.

Приведен диапазон режимных параметров, при которых будет проведено экспериментальное обоснование теплогидравлических схем РУ, использующих тепловые и гидравлические связи.

Давление  $P = 10\text{--}16$  МПа, массовая скорость  $1000\text{--}3000$  кг/м<sup>2</sup>с.

На основе диапазона режимных параметров определены параметры теплогидравлического стенда и измерительных средств. Представлена методика выполнения исследований и обработки полученных данных. В ПМ также определен объем и последовательность экспериментальных исследований.

Представлено описание методики расчета кризиса теплоотдачи на выпуклой и вогнутой теплоотдающих поверхностях трубчатого твэла.

Разработана программа расчета теплогидравлических характеристик трубчатого твэла (модель эквивалентного канала) FUTEI (Fuel Tube with External and Internal Cooling)

Приведено описание программы расчета теплогидравлических характеристик трубчатого твэла на основе одностержневой модели.

*Программа и методика экспериментальных исследований, направленных на обоснование теплогидравлических схем ТВС, использующих тепловые и гидравлические обратные связи для повышения безопасности и энергонапряженности РУ ВВЭР (промежуточный)/рук. Э.А. Болтенко; исполн.: М.В. Давыдов, А.В. Басов, Г.Е. Новичков. - Электрогорск, 2022 — 35 с. - Инв. №110.854*

## **Программа и методика исследований локальных параметров в электрообогреваемой сборке, моделирующей ТВС РУ «ШЕЛЬФ-М»**

*Руководитель работы: д-р техн. наук Э.А. Болтенко*

*Исполнители: старший научный сотрудник, канд. техн. наук М.В. Давыдов; главный специалист А.В. Басов; главный специалист А.И. Шариков; специалист первой категории Г.Е. Новичков*

Представлена программа и методика исследований, направленная на определение локальных параметров и структуры потока в электрообогреваемой 55-ти стержневой сборке. Приведен диапазон режимных параметров, при которых будет проведено исследование. Давление до 15 МПа, массовая скорость 500-1000 кг/м<sup>2</sup>с.

Знание локальных параметров необходимо для разработки и верификации межъячейковых программ моделирования одно-двухфазных потоков. Данные такого рода можно получить путем отбора проб из характерных ячеек сборки. Отбор проб из характерных ячеек сборки выполняют используя метод «изокинетического отбора».

Условия изокинетического отбора заключаются в том, что параметры потока теплоносителя, в который входит пробоотборник, остаются такими же, какими они были до ввода пробоотборника в точку отбора. Параметры потока, которые используются для соблюдения условий «изокинетичности» отбора, могут быть различными.

Данная программа содержит краткое описание объекта исследований — электрообогреваемой сборки, моделирующей ТВС РУ «ШЕЛЬФ-М»). Приведено краткое описание методики определения средних скоростей в сборках с закрученными по высоте имитаторами твэл. Для выполнения измерений предварительно формируют ячейки отбора путем продления стенок имитаторов и замещения жидких границ исследуемых ячеек от выхода активной части сборки до контрольного сечения. Ячейки отбора формируются путем установки в контрольном сечении выходной решетки. Отбор проб проводится путем ввода пробоотборника в ячейку решетки. В работе описан предложенный в работе метод отбора, не требующий ввода пробоотборника в процессе измерений. Пробоотборник устанавливается в ячейку отбора до начала проведения измерений. Описана схема установки для проведения измерений и порядок проведения отбора.

*Программа и методика исследований локальных параметров в электрообогреваемой сборке, моделирующей ТВС РУ «ШЕЛЬФ-М» / рук. Э.А. Болтенко; исполн.: М.В. Давыдов, А.В. Басов, А.И. Шариков, Г.Е. Новичков. — Электрогорск, 2022 — 26 с. — Инв. № 599/23*

## **Разработка и изготовление испытательного стенда и испытания макетов впускного клапана привода исполнительного механизма системы управления и защиты реактора (ИМ СУЗ)**

*Руководитель работы: канд. техн. наук Н.А. Брус*

*Исполнители: начальник конструкторско-технологического отдела А.В. Столпник; главный специалист В.В. Сердюков*

В конструкции РУ БРЕСТ-ОД-300 предусмотрен впускной клапан (обратный воздушный, код 28.14.11.131, условный диаметр 30 мм, масса 1 кг) предназначенный:

- для впуска воздуха из центрального зала РУ в охлаждающую полость привода ИМ СУЗ и оттуда в полость защитного колпака РУ при давлении воздуха в полости защитного колпака ниже давления воздуха в центральном зале;
- для закрытия прохода воздуха из полости защитного колпака РУ в центральный зал при увеличении давления воздуха в полости защитного колпака до величины давления в центральном зале и выше.

Главным конструктором реактора АО «НИКИЭТ» были разработаны три варианта макетов впускного клапана. Для подтверждения технических характеристик разработанных макетов клапана и выбора оптимального варианта было решено провести сравнительные испытания макетов вновь разработанных клапанов. С АО «ЭНИЦ» был заключен договор на проведение соответствующих ОКР. Для решения поставленной задачи в АО «ЭНИЦ» был спроектирован и изготовлен испытательный стенд, а также выполнены ниже перечисленные испытания макетов впускного клапана привода ИМ СУЗ:

- на пропускную способность;
- на герметичность;
- на ресурс;
- на воздействие вибрации при транспортировании;
- на сейсмичность.

Для проведения испытаний на воздействие вибрации и сейсмичность была привлечена сторонняя организация, имеющая необходимое испытательное оборудование, аккредитацию и опыт работ в данной области.

В ходе испытаний была выбрана оптимальная конструкция клапана и сформированы требования для дальнейшего рабочего проектирования.

Стенд передан для дальнейшего использования Заказчику (АО «НИКИЭТ»).

*Разработка и изготовление испытательного стенда и испытания макетов впускного клапана привода ИМ СУЗ; рук. Н.А. Брус; исполн.: А.В. Столпник, В.В. Сердюков. — Электрогорск, 2022. — 49 с. — Инв. № 589/22.*

**Разработка системы по управлению старением конструкций, систем и компонентов на всех этапах жизненного цикла энергоблоков АЭС в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ в части проведения испытаний материалов представительных образцов контрольно-измерительных приборов и автоматики АЭС и исследование механизмов их старения. Этап 2022 года»**

*Руководитель проекта: А.В. Звонарев*

*Отв. исполн. начальник отдела экспериментального подтверждения ресурсных характеристик Ю.А. Серебрянников; исполн.: начальник отдела разработки нормативно-технической документации Д.В. Богомолов; начальник отдела аналитического и методического обеспечения Т.Ю. Афанасьева; главный специалист А.В. Басов; главный специалист Л.Ю. Серебрянникова*

Цель работы являлось проведение модельного старения образцов пассивных коммутационных элементов систем контроля и управления типа СН-38 и СНЦ 3М, входящих в состав систем, важных для безопасности АЭС, и исследование проявления старения образцов пассивных коммутационных элементов после моделирования эксплуатации в течение 20 лет в условиях АЭС.

В результате работы выполнено следующее:

- проведены ускоренные климатические испытания образцов пассивных коммутационных элементов термовлажностным методом, моделирующие 20 лет эксплуатации в условиях АЭС, в соответствии с программой и методикой.
- проведено исследование технического состояния образцов пассивных коммутационных элементов до и после испытаний на соответствие технических характеристик техническим условиям;
- проведено исследование механизмов старения образцов пассивных коммутационных элементов;
- подтверждено соответствие характеристик образцов пассивных коммутационных элементов требованиям технических условий после моделирования старения в течение 20 лет.

Результаты работ показали, что проведенное моделирование эксплуатации образцов КИПиА в течение 20 лет не привели к изменению технических характеристик образцов, указанных в технических условиях. Подтверждено 100% сохранение работоспособности образцов пассивных коммутационных элементов.

*«Разработка системы по управлению старением конструкций, систем и компонентов на всех этапах жизненного цикла энергоблоков АЭС в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ в части проведения испытаний материалов представительных образцов контрольно-измерительных приборов и автоматики АЭС и исследование механизмов их старения»*

*механизмов их старения. Этап 2022 года по теме: «Проведение испытаний материалов представительных образцов контрольно-измерительных приборов и автоматики АЭС и исследование механизмов их старения (этап 1) (промежуточный)» Отчет о НИОКР/рук. А.В. Звонарев; отв. исполн. Ю.А. Серебренников; исполн.: Д.В. Богомолов, Т.Ю. Афанасьева, А.В. Басов, Л.Ю. Серебренникова. — Электрогорск, 2022 — 172 с. — Инв. № 188.849.*

*Разработка системы по управлению старением конструкций, систем и компонентов на всех этапах жизненного цикла энергоблоков АЭС в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ в части проведения испытаний материалов представительных образцов контрольно-измерительных приборов и автоматики АЭС и исследование механизмов их старения. Этап 2022 года по теме: «Проведение испытаний материалов представительных образцов контрольно-измерительных приборов и автоматики АЭС и исследование механизмов их старения (этап 2) (заключительный)» Отчет о НИОКР/рук. А.В. Звонарев; отв. исполн.; Ю.А. Серебренников, Д.В. Богомолов, Т.Ю. Афанасьева, А.В. Басов, Л.Ю. Серебренникова. — Электрогорск, 2022 — 116 с. — Инв. № 188.851.*

## **Испытательная лаборатория АО «ЭНИЦ»**

*Руководитель лаборатории: канд. техн. наук Н.А. Брус*

АО «ЭНИЦ» аккредитован государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» как испытательная лаборатория (далее ИЛ, аттестат аккредитации от 28.12.2021 № ОИАЭ.RU179ИЛ(ИЦ)). ИЛ АО «ЭНИЦ» проводит с 2016 года работы по оценке соответствия продукции для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, обязательным требованиям.

Аккредитация ИЛ АО «ЭНИЦ» произведена в соответствии с пунктом 33 Правил аккредитации органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров), выполняющих работы по подтверждению соответствия продукции, для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, обязательным требованиям, аттестации экспертов по аккредитации в области использования атомной энергии, а также привлечения и отбора экспертов по аккредитации в области использования атомной энергии и технических экспертов для выполнения работ по аккредитации, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 20.07.2013 N 612.

Порядок проведения оценки соответствия в форме испытаний устанавливается ГОСТ Р 50.04.08-2019.

ИЛАО «ЭНИЦ» располагает испытательными стендами, позволяющими проводить испытания различных типов арматуры трубопроводной и теплообменников в следующем диапазоне воздействующих факторов:

- давление (избыточное) от 0 до 20 МПа (испытательная среда вода, пар, воздух);

- давление (избыточное) при проведении испытаний на прочность, плотность и герметичность до 40 МПа (испытательная среда вода);
- температура от 5 °С до 350 °С (испытательная среда вода, пар);
- расход от 0 до 550 м<sup>3</sup>/час (испытательная среда вода).

Наряду с испытаниями арматуры трубопроводной в ИЛ АО «ЭНИЦ» проводились испытания различных конструкций струйных насосов, деаэраторов и вновь разработанных элементов оборудования для АЭС.

Кроме того, ИЛ АО «ЭНИЦ» проводит испытаний аппаратуры, приборов, устройств и оборудования систем управления технологическими процессами атомных станций на стойкость, прочность и устойчивость к внешним воздействующим факторам в следующем диапазоне:

- температура от 40 °С до 250 °С;
- давление от 0,079 до 0,500 МПа;
- испытательная среда – парогазовая смесь.

Испытательные стенды АО «ЭНИЦ» оборудованы автоматизированной системой сбора и обработки контролируемых параметров. Данные о проведенных испытаниях хранятся в электронном виде до окончания срока эксплуатации испытанного оборудования.

ИЛ АО «ЭНИЦ» располагает климатическими камерами, позволяющими проводить испытания оборудования на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам (температура от минус 75 °С до 130 °С и влажности).

Наряду с испытаниями оборудования ИЛ АО «ЭНИЦ» проводит измерительный контроль поставляемых к эксплуатируемому на АЭС оборудованию комплектующих (запасных частей).

ИЛ АО «ЭНИЦ» за последние пять лет выпущено более 120 протоколов испытаний продукции.

В ближайшее время планируется расширить область аккредитации ИЛ АО «ЭНИЦ» по следующим направлениям:

- установить для проведения испытаний верхний предел расхода испытательной среды (воды) 1500 м<sup>3</sup>/час;
- получить аккредитацию на отбор образцов для испытаний продукции при подтверждении соответствия (в соответствии с ГОСТ Р 58972).

Для расширения области аккредитации по вышеуказанным направлениям ИЛ АО «ЭНИЦ» введено в эксплуатацию необходимое испытательное оборудование.

## **Оказание услуг по оценке соответствия в форме экспертизы технической документации на продукцию, для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии**

*Руководитель работ: заместитель директора по АСУ ТП В.А. Кондрашов*

*Эксперты: А.И. Грищенко, А.И. Сурин, В.И. Саунов, П.С. Сергеев.*

Экспертная организация АО «ЭНИЦ» (далее — ЭО) проводит оценку соответствия в форме экспертизы технической документации (ЭТД) на продукцию, указанную в НП-071-18 и по процедуре, установленной ГОСТ Р 50.03.01 — 2017.

Виды продукции, в отношении которой АО «ЭНИЦ» имеет право проводить ЭТД определен перечнем, размещенном на официальном сайте ГК «Росатом», в разделе «Техническое регулирование». Сюда входит:

- Тепломеханическое оборудование;
- КИП автоматики, АСУ ТП, ИВС;
- Насосное оборудование;
- Теплообменное оборудование;
- Трубопроводная арматура;
- Электротехническое оборудование;
- Оборудование СЛА атомных станций.

В период с 2018 по текущее время ЭО выдала 245 экспертных заключений на различные виды продукции из них (в процентном соотношении):

- Тепломеханическое оборудование — 7%;
- КИП автоматики, АСУ ТП, ИВС — 38%;
- Насосное оборудование — 17%;
- Теплообменное оборудование — 5%;
- Трубопроводная арматура — 13%;
- Электротехническое оборудование — 12%;
- Импортные электронные компоненты — 8%.

*Перечень экспертных заключений, выданных ЭО, находится в «Реестре выданных экспертных заключений о соответствии технической документации обязательным требованиям», размещённом на сайте Госкорпорации «Росатом» по ссылке «[https://www.rosatom.ru/about/tekhnicheskoe-regulirovanie/otsenka-sootvetstviya-v-oblasti-polzovaniya-atomnoy-energii/-/»](https://www.rosatom.ru/about/tekhnicheskoe-regulirovanie/otsenka-sootvetstviya-v-oblasti-polzovaniya-atomnoy-energii/).*

## **Подготовка имитационных зон для проведения пуско-наладочных работ на АЭС в 2018–2022 гг.**

*Руководитель работ: Е.В. Муравьев*

*Исполнители: В.И. Акинин, О.Н. Трубкин, В.А. Сафронов,  
О.В. Шатерникова*

Использование имитационной зоны в период пусконаладочных работ на блоках вновь сооружаемых АЭС позволяет отработать и выполнить предусмотренные программой ПНР технологические процедуры, провести необходимые исследования теплогидравлических и вибродинамических характеристик реактора и первого контура. Имитационная зона состоит из 163 полномасштабных имитаторов ТВС, в которых топливные матрицы из ядерно-делящегося материала заменены свинцовыми имитаторами и 115 имитаторов ПС СУЗ. В составе имитационной зоны они предназначены для моделирования геометрии активной зоны реактора и подтверждения гидравлических характеристик реакторной установки при циркуляционной промывке и холодно-горячей обкатке реактора. Также они необходимы для отработки транспортно-технологических операций с использованием перегрузочной машины.

С целью оптимизации процессов строительства новых блоков имитационные зоны используют многократно. Перед повторным применением на АЭС имитационные зоны подвергаются комплексу операций в АО «ЭНИЦ» с целью:

- удаления поверхностных загрязнений и посторонних предметов из конструкции имитаторов с применением специально разработанной технологии химической отмывки;
- проведения визуального и инструментального контроля имитаторов;
- герметичной упаковки с применением новых упаковочных материалов в транспортно-упаковочные комплекты.

В АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (Главный конструктор реакторной установки) проводятся испытания по оценке коэффициента гидравлического сопротивления имитаторов. Результаты испытаний используются для оценки расходов теплоносителя через активную зону реактора и определения приёмочных критериев завершения испытаний на этапе холодно-горячей обкатки реакторной установки.

По результатам выполнения всех вышеуказанных операций были выданы заключения о возможности повторного использования имитационных зон:

- в 2018 году для энергоблока 2 Нововоронежской АЭС-2;
- в 2019 году для энергоблока 2 Ленинградской АЭС-2;
- в 2022 году для энергоблока 1 АЭС Руппур (Бангладеш).

## **Сбор данных, верификация и формирование информационных ресурсов о качестве оборудования, поставляемого на действующие и строящиеся атомные станции АО «Концерн Росэнергоатом». Мониторинг достижения целей в области качества продукции, работы поставщиков, изготовителей и специализированных организаций**

*Руководитель работы канд. техн. наук П.П. Савкин*

*Исполнители: главный специалист С.В. Кондратьев, главный специалист*

*О.В. Корнева, главный специалист М.Ю. Куликов, ведущий инженер*

*О.И. Кондрашова, инженер 2 категории В.В. Сысоева, инженер 1 категории*

*М.В. Гришкевич, техник К.С. Белякова*

АО «ЭНИЦ» с 2012 года проводит работу по созданию и ведению Информационно-аналитической системы «Качество оборудования, поставляемого на АЭС АО «Концерн Росэнергоатом», в интересах Концерна.

Целями работы являются:

1. Сбор, обработка, хранение, формирование информационных ресурсов о качестве оборудования на этапах его жизненного цикла (изготовление продукции, ее входной контроль, пуско-наладочные работы, эксплуатация).

2. Анализ и подготовка оперативной информации по результатам контроля качества оборудования, поставляемого на АЭС.

3. Рассмотрение программ обеспечения качества.

Основные задачи работы:

- информационное обеспечение управленческих решений и мероприятий, направленных на повышение качества оборудования, поставляемого на действующие и строящиеся атомные станции АО «Концерн Росэнергоатом», путем сбора, обработки, систематизации и анализа информации о качестве оборудования для АЭС и предоставления требуемой информации по запросам Департамента качества АО «Концерн Росэнергоатом» (далее – Заказчик);
- информационное обеспечение мониторинга достижения целей в области качества продукции, работы поставщиков, изготовителей и специализированных организаций (далее – СО);
- ведение в программном обеспечении MS SQL Server, MS Access (далее – Система) систематизированного массива информации о качестве оборудования, поставляемого на действующие, строящиеся и выведенные из эксплуатации атомные станции АО «Концерн Росэнергоатом»;
- подготовка замечаний и предложений по результатам рассмотрения программ обеспечения качества (ПОК(Р) и ПОК(И)) предприятий разработчиков и изготовителей продукции для АЭС.

В результате проведения работ выполнено:

- сбор, обработка и анализ информации о качестве оборудования, изготавливаемого и поставляемого на действующие и строящиеся АЭС;

- сформирован электронный информационный массив данных по качеству оборудования, который установлен на технических средствах Заказчика (информационный ресурс KHOL-QUALITY-DB.co.rosenergoatom);
- подготовлены: оперативная информация, доклады, справки, презентации по результатам контроля качества оборудования;
- сформирован актуальный реестр поручений, в Информационно-Аналитическую Систему «Качество оборудования, поставляемого на АЭС» внесены поручения, выданные СО;
- постоянно ведутся списки заводов-изготовителей, на которых СО ведут работы по оценке соответствия;
- осуществлены сбор, обработка и систематизация данных о несоответствиях;
- выполнен анализ актов ВК и отчетов о ВК действующих и строящихся АЭС, составлены заключения об их соответствии требованиям РД ЭО 1.1.2.01.0931-2021;
- проанализированы несоответствия, выявленные на входном контроле продукции, прошедшей оценку соответствия АО ВО «Безопасность» и АО «ВПО «ЗАЭС»;
- составлены реестры о введенной информации:
  - ✧ зарегистрированных Решений о применении импортного оборудования, изделий, материалов и комплектующих;
  - ✧ несоответствий, выявленных при проведении ПНР;
  - ✧ несоответствий, выявленных при эксплуатации оборудования (эксплуатационные отказы);
  - ✧ применённой импортной продукции по решениям о неоднократном применении импортной продукции (за исключением полуфабрикатов и для полуфабрикатов).

Результаты, полученные в данной работе, используются:

- при оценке качества продукции предприятий;
- при проведении системного анализа несоответствий и разработке мероприятий по управлению несоответствиями;
- при подготовке программ проверки предприятий-изготовителей;
- для разработки и совершенствования программ обеспечения качества разработчиков/изготовителей при разработке и изготовлении продукции для АЭС;
- для контроля, учета объемов и эффективности работы специализированных организаций.

К настоящему времени на основе обработанных и внесенных в информационную систему исходных данных ведутся Справочники и Реестры:

- справочник контрагентов (поставщики, изготовители) и их реквизиты – 8290 записей;

- Списки изготовителей, на предприятиях которых СО выполняют приёмку (ежеквартально более 500);
- Реестр поручений, выданных СО (всего более 43 000 поручений);
- Реестр несоответствий, выявленных при изготовлении (более 19 000 записей);
- Реестр несоответствий, выявленных в ходе эксплуатации (отказы) – более 3 000 записей;
- Реестр несоответствий, выявленных при проведении ПНР (6 800 записей);
- Реестр Решений о применении импортной продукции (более 2 500 записей);
- Реестр неоднократно применённой импортной продукции (более 10 800 записей);
- Реестр ПОК, прошедших экспертизу в АО «ЭНИЦ» (4000 записей).

Разработаны более **70** отчетных форм о качестве продукции, оценки изготовителей (поставщиков), специализированных организаций, и **13** справочников и классификаторов.

С 2012 года подготовлено по запросам Заказчика (Департамента качества Концерна) более **2000** справок, отчетов, информации для презентаций, докладов (о качестве продукции, работе поставщиков, изготовителей и специализированных организаций).

Информационная система соответствует требованиям нормативных документов по безопасности информации и аттестована по классу защищенности 1Г.

*Сбор данных, верификация и формирование информационных ресурсов о качестве оборудования, поставляемого на действующие и строящиеся атомные станции АО «Концерн Росэнергоатом». Мониторинг достижения целей в области качества продукции, работы поставщиков, изготовителей и уполномоченных организаций / рук. П.П. Савкин; исполн.: С.В. Кондратьев, О.В. Корнева, М.Ю. Куликов, О.И. Кондрашова, В.В. Сысоева, М.В. Гришкевич, К.С. Белякова. — Электрогорск, 2018. — 389 с. — Инв. №520.1/18; 377 с. — Инв. №520.2/18 — 340 с. — Инв. №547.1/18; — 345 с. — Инв. №547.2/18.*

*Сбор данных, верификация и формирование информационных ресурсов о качестве оборудования, поставляемого на действующие и строящиеся атомные станции АО «Концерн Росэнергоатом». Мониторинг достижения целей в области качества продукции, работы поставщиков, изготовителей и уполномоченных организаций / рук. П.П. Савкин; исполн.: С.В. Кондратьев, О.В. Корнева, М.Ю. Куликов, О.И. Кондрашова, В.В. Сысоева, М.В. Гришкевич, К.С. Белякова. — Электрогорск, 2019. — 324 с. — Инв. №554.1/19; 353 с. — Инв. №554.2/19; 355 с. — Инв. №556.1/19; 346 с. — Инв. №556.2/19.*

*Сбор данных, верификация и формирование информационных ресурсов о качестве оборудования, поставляемого на действующие и строящиеся атомные станции АО «Концерн Росэнергоатом». Мониторинг достижения целей в области качества*

*продукции, работы поставщиков, изготовителей и уполномоченных организаций / рук. П.П. Савкин; исполн.: С.В. Кондратьев, О.В. Корнева, М.Ю. Куликов, О.И. Кондрашова, В.В. Сысоева, М.В. Гришкевич, К.С. Белякова. — Электрогорск, 2020. — 343 с. — Инв. №561.1/20; 292 с. — Инв. №561.2/20; 313 с. — Инв. №565.1/20; 337 с. — Инв. №565.2/20.*

*Сбор данных, верификация и формирование информационных ресурсов о качестве оборудования, поставляемого на действующие, строящиеся и выведенные из эксплуатации атомные станции АО «Концерн Росэнергоатом». Мониторинг достижения целей в области качества продукции, работы поставщиков, изготовителей и специализированных организаций / рук. П.П. Савкин; исполн.: С.В. Кондратьев, О.В. Корнева, М.Ю. Куликов, О.И. Кондрашова, В.В. Сысоева, М.В. Гришкевич, К.С. Белякова. — Электрогорск, 2021. — 320 с. — Инв. №566.1/21; 318 с. — Инв. №566.2/21; 365 с. — Инв. №572.1/21; 383 с. — Инв. №572.2/21.*

*Сбор данных, верификация и формирование информационных ресурсов о качестве оборудования, поставляемого на действующие, строящиеся и выведенные из эксплуатации атомные станции АО «Концерн Росэнергоатом». Мониторинг достижения целей в области качества продукции, работы поставщиков, изготовителей и специализированных организаций / рук. П.П. Савкин; исполн.: С.В. Кондратьев, О.В. Корнева, М.Ю. Куликов, О.И. Кондрашова, В.В. Сысоева, М.В. Гришкевич, К.С. Белякова. — Электрогорск, 2022. — 284 с. — Инв. №585.1/22; 334 с. — Инв. №585.2/22; 274 с. — Инв. №595.1/23; 327 с. — Инв. №595.2/23.*

## **Оказание услуг по оценке соответствия в области использования атомной энергии в форме обязательной сертификации продукции**

*Руководитель органа по сертификации: директор АО «ЭНИЦ» — С.Н. Селькин*

*Руководитель работ: начальник отдела оценки соответствия — Д.В. Селезнев*

Орган по сертификации АО «ЭНИЦ» аккредитован в 2015 году Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» в качестве Органа по сертификации продукции, выполняющего работы по оценке соответствия продукции, для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии (аттестат аккредитации № ОИАЭ.RU.192 ОС от 12.05.2022).

Область аккредитации Органа по сертификации АО «ЭНИЦ» охватывает основную часть продукции, включенной в перечень продукции, которая подлежит обязательной сертификации и для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии (приказ Федеральной службы по экономическому, технологическому и атомному надзору от 21 июля 2017 года № 277) и в настоящее время состоит из следующих групп однородной продукции:

- продукция электротехническая (электродвигатели, кабельная продукция);
- насосы и насосные агрегаты (насосы, агрегаты и установки насосные и ЗИП к ним);
- арматура трубопроводная;
- вычислительная техника;
- приборы, устройства, блоки и узлы (дозиметрия, радиометрия, спектрометрия, приборы радиоизотопные, детекторы ионизирующих излучений);
- программно-технические комплексы для автоматизированных систем;
- программные средства и информационные продукты вычислительной техники;
- реакторы ядерные и оборудование атомных электростанций;
- продукция изотопная;
- средства индивидуальной защиты.

За период с начала 2018 года по май 2023 года органом по сертификации АО «ЭНИЦ» выдано 249 сертификатов соответствия, из них:

- 122 – серийный выпуск;
- 103 – на партию продукции;
- 18 – на единичное изделие.

Проведено 195 инспекционных контролей, из них:

- 55 – сертификатов продлено;
- 64 – отменено.
- 0 – приостановлено.

За время функционирования Органа по сертификации АО «ЭНИЦ» область аккредитации подвергалась расширению и включила в себя такие важные для отрасли группы однородной продукции, как:

- продукция изотопная;
- средства индивидуальной защиты;
- кабельная продукция;
- запасные части к насосным агрегатам.

На базе аттестационной комиссии Органа по сертификации АО «ЭНИЦ» аттестовано 27 эксперта по сертификации продукции по различным группам однородной продукции, входящим в область аккредитации органа по сертификации. Ежегодно принимаются заявки на аттестацию и проводятся соответствующие процедуры по аттестации кандидатов в эксперты, продлению аттестатов и расширению областей аттестации действующих экспертов по сертификации.

В рамках процедур по сертификации органом по сертификации АО «ЭНИЦ» проведена сертификация продукции для множества организаций отрасли, в том числе:

- филиалы АО «Концерн Росэнергоатом» – отечественные атомные станции (действующие и строящиеся блоки);
- АЭС «Руппур»;
- Белорусская АЭС;
- ФГУП «ГХК»;
- АО «В/О» «Изотоп».

*Сведения о выданных органом по сертификации АО «ЭНИЦ» сертификатах соответствия размещены в «Реестре выданных сертификатов соответствия продукции, для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, выданных начиная с 01.01.2018» на официальном сайте Госкорпорации «Росатом» по ссылке <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/d46/d4646b8016e3a30963df3fef8afff7bb.pdf>.*

## **Экспериментальное обоснование оптимизации расходной характеристики системы ГЕ-2. Выполнение экспериментов. Обработка полученных данных**

*Руководитель работы: заместитель директора по научной работе – начальник управления НИР и НИОКР в области теплофизики, канд. техн. наук В.Д. Локтионов*

*Исполнители: ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук Г.И. Дремин; ведущий научный сотрудник, главный специалист А.В. Басов; главный специалист А.И. Шариков; ведущий специалист И.В. Кононенко; специалист 1-й категории О.Н. Трубкин; начальник КТО А.В. Столпник; эксперт О.Л. Лазарев*

Для проекта РУ В-510 (ВВЭР-ТОИ) выполнено экспериментальное исследование по проверке и обоснованию технического решения для узла оптимизации расходной характеристики системы ГЕ-2 пассивного залива активной зоны РУ, которое позволит более эффективно использовать запас воды в гидроемкостях ГЕ-2 в целях обеспечения их функционального назначения.

Работа была выполнена на экспериментальном стенде «Расходная характеристика ГЕ-2» по договору №09-03/21/223/118(167/2048-Д) от 28.03.2022 между АО «ЭНИЦ» и НИЦ «Курчатовский институт». При этом были задействованы элементы и системы стенда ПСБ-ВВЭР и вновь разработанное и смонтированное дополнительное оборудование (емкость, моделирующая сосуд одного канала системы ГЕ-2; соединительные трубопроводы; специальная регулирующая и запорная арматура; новая система измерения теплофизических параметров).

Исходными данными для выполнения работы являлись материалы, относящиеся к системе ГЕ-2 НВАЭС-2, а также предварительные изыска-

ния по теме настоящего исследования, выполненные НИЦ «Курчатовский институт» и АО «ЭНИЦ».

Испытания по истечению охладителя из модели сосуда гидроемкости системы ГЕ-2 проводились для различных условий поступления воздуха и парогазовой среды в модель сосуда, а также различных типов используемой охлаждающей среды (вода, раствор борной кислоты). Были проведены несколько серий экспериментов с использованием воды без наличия борной кислоты, а также с растворами борной кислоты с концентрацией от 9 до 24 г/л. Температура охлаждающей воды в сериях экспериментов варьировалась от 20 до 85 °С. Эксперименты проводились как с насыщенным паром (избыточное давление в модели сосуда до 0,5 МПа), так и с его смесью с неконденсируемым газом (азот) в случае испытаний с раствором борной кислоты.

Исследования включали испытания при атмосферном давлении и с истечением воды (температура ~20, 60 и 75...85 °С) без добавления борной кислоты и с поступлением воздуха, а также испытания с раствором борной кислоты. Также были выполнены серии испытаний при давлении 0,3–0,5 МПа с истечением воды без добавления борной кислоты и поступлении насыщенного пара в объем модели емкости системы ГЕ-2. Третья серия экспериментов включала выполнение испытаний при давлении 0,3–0,5 МПа и с истечением воды с добавлением борной кислоты и с поступлением парогазовой смеси в объем модели сосуда системы ГЕ-2.

Результаты выполненных исследований и испытаний подтвердили возможность выполнения требования пункта 2.5 программы НИОКР совершенствования проектных решений традиционной технологии ВВЭР. Время (экспериментальное) истечения борного раствора из модели сосуда системы ГЕ-2 (объемный масштаб 1:25) с оптимизированной расходной характеристикой оказалось не менее 7000 с. Такое значение времени истечения из модели сосуда ГЕ-2, масштабированное на прототип, подтверждает возможность обеспечения подачи охлаждающей воды из ГЕ-2 в РУ в течение не менее 48 часов.

Результаты испытаний позволили сделать важный вывод, что наличие борной кислоты с концентрацией от ~9 до 24 г/л в охлаждающей воде не оказывает существенного влияния на характер и динамику истечения охладителя из сосуда гидроемкости системы ГЕ-2. Ряд эффектов, связанных с наличием борной кислоты в охлаждающей воде (характер конденсации раствора борной кислоты при различных давлениях; эффекты, связанные с растворимостью газовой фазы в растворе борной кислоты при различных ее концентрациях, температурах и давлениях), требуют более детального рассмотрения в дальнейших исследованиях.

Специальное устройство, установленное на входном тракте модели сосуда ГЕ-2, позволило уменьшить величину и продолжительность возмущений,

возникающих при конденсационных ударах. Более детальное изучение переходных процессов, связанных с эффектами конденсации парогазовой среды внутри сосуда гидроемкости системы ГЕ-2 на начальных стадиях процесса истечения, а также разработка моделей конденсации в течение всего процесса работы системы ГЕ-2, являются актуальными и требуют дальнейших углубленных исследований.

*Экспериментальное обоснование оптимизации расходной характеристики системы ГЕ-2. Выполнение экспериментов. Обработка полученных данных / рук. В.Д. Локтионов; исполн.: Г.И. Дремин, А.В. Басов, А.И. Шариков, И.В. Кононенко, О.Н. Трубкин, А.В. Столпник, О.Л. Лазарев. – Электрогорск, 2023 – 78 с. – Инв. № 110.855.*

## **Изготовление и проведение испытаний полномасштабного макета устройства циркуляционно-барботажного системы локализации течи парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300**

*Руководитель работы: канд. техн. наук Н.А. Брус*

В рамках работ по созданию РУ БРЕСТ-ОД-300 АО «НИКИЭТ» был заключен договор с АО «ЭНИЦ» на выполнение НИОКР «Изготовление и проведение испытаний полномасштабного макета устройства циркуляционно-барботажного системы локализации течи парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300» (далее УЦБ).

В ходе выполнения данного НИОКР АО «ЭНИЦ» были решены следующие задачи:

- разработана РКД на испытательный стенд и полномасштабный макет УЦБ;
- по разработанной РКД изготовлен полномасштабный макет УЦБ и смонтирован испытательный стенд;
- проведены испытания полномасштабного макета УЦБ.

Испытания проводились в целях подтверждения работоспособности, проектных технических характеристик устройства циркуляционно-барботажного системы локализации течи парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300, а также получения экспериментальных данных для верификации программных средств.

Испытания полномасштабного макета УЦБ были нацелены на решение двух задач.

Первая задача – это обоснование конденсирующей способности УЦБ. Конденсирующая способность УЦБ характеризуется массой водяного пара, который может быть полностью сконденсирован в УЦБ.

Вторая задача – экспериментальное обоснование проектных параметров петли системы локализации течи парогенератора (далее СЛТП) в процессе локализации течи в парогенераторе (далее ПГ).

Для решения первой задачи была проведена серия испытаний, в которых перегретый водяной пар с фиксированным расходом и температурой до 460 °С подавался непосредственно в подводящий трубопровод УЦБ Ду400. В ходе испытаний от режима к режиму массовый расход пара изменялся от 1,5 кг/с до 11 кг/с.

Для решения второй задачи использовалась модель газовой полости (МГП), трубопровода СЛТП с УЦБ. В этом случае, водяной пар температурой до 460 °С подавался непосредственно в МГП. Расход пара изменялся от исходного заданного значения до нуля. Были проведены испытания при разных исходных значениях массового расхода (от 2,5 кг/с до 11 кг/с).

По результатам проведенных испытаний была сформирована база экспериментальных данных, которая используется АО «НИКИЭТ» для верификации компьютерных программ, задействованных для обоснования безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300.

В настоящее время испытательный стенд с полномасштабным макетом УЦБ находится в рабочем состоянии на ответственном хранении в АО «ЭНИЦ».

## РУКОВОДИТЕЛИ ПРЕДПРИЯТИЯ

За 65-летнюю историю ЭИЛ–ЭНИС–ЭНИЦ руководителями предприятия являлись:

*Регентов Тимофей Пантелеевич* — 1957–1958 гг. начальник ЭИЛ;

*Задирако Виктор Михайлович* — 1959–1961 гг. начальник ЭИЛ;

*Холодовский Георгий Евгеньевич* — 1961 г. и.о. начальника ЭИЛ;

*Ларионов Николай Петрович* — 1961–1962 гг. и.о. начальника ЭИЛ;

*Птицин Георгий Васильевич* — 1963–1966 гг. начальник ЭИЛ;

*Телегин Александр Иванович* — 1966–1979 гг. начальник ЭИЛ, директор ЭНИС;

*Ларионов Николай Петрович* — 1979–1989 гг. директор ЭНИС;

*Нигматулин Булат Искандерович* — 1989–1998 гг. директор ЭНИС, ЭНИЦ;

*Блинков Владимир Николаевич* — 1998–2012 гг. директор ЭНИЦ, генеральный директор ФГУП «ЭНИЦ», директор ОАО «ЭНИЦ»;

*Селькин Сергей Николаевич* — с 2012 г. по настоящее время директор ОАО «ЭНИЦ», АО «ЭНИЦ».

Оригинал-макет подготовлен  
в АО «Электрогорский научно-исследовательский центр  
по безопасности атомных электростанций»  
142530, Московская обл., г. Электрогорск, ул. Св. Константина, 6

Подписано в печать 29.07.2023. Формат  $70 \times 100 \frac{1}{16}$ .  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Объем 26,25 печ.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ООО «Радугапринт».  
117105, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 28А  
Тел.: (495) 252-75-10.  
<http://www.raduga-print.ru>



9 785887 770406