

На правах рукописи



ЕМЕЛЬЯНОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫРАВНИВАНИЯ  
ПАРОВОЙ НАГРУЗКИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ  
ПАРОГЕНЕРАТОРЕ ВВЭР С ПОМОЩЬЮ  
ДЫРЧАТОГО ЛИСТА**

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические  
установки,  
включая проектирование, эксплуатацию и вывод из  
эксплуатации

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» на кафедре Атомных электрических станций.

Научный руководитель: **Мелихов Олег Игорьевич**  
доктор технических наук,  
зам. директора по научной работе –  
начальник управления НИК и НИОКР в  
области теплофизики АО «ЭНИЦ»,  
г. Электрогорск.

Официальные оппоненты: **Морозов Андрей Владимирович**  
доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник АО  
«Государственный научный центр  
Российской Федерации – Физико-  
энергетический институт имени А.И.  
Лейпунского», г. Обнинск.

**Крекунов Олег Петрович**  
кандидат технических наук,  
главный специалист отдела обоснования  
безопасности и НИОКР АО  
«АТОМПРОЕКТ», г. Санкт-Петербург..

Ведущая организация: АО «Научно-исследовательский и  
конструкторский институт энерготехники  
им. Н. А. Доллежала», г. Москва.

Защита состоится 15 июня 2017 года в 12:00 на заседании диссертационного  
совета Д 002.070.01 при Федеральном государственном бюджетном  
учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной  
энергетики Российской академии наук по адресу: 115191, г. Москва, ул.  
Б.Тульская, д.52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем  
безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и на  
сайте <http://www.ibrae.ac.ru/contents/312/>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н.



В.Е.Калантаров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одной из актуальных задач российской и мировой атомной энергетики является повышение уровня мощности энергоблоков АЭС с ВВЭР. Новые проекты АЭС с ВВЭР с самого начала проектируются на повышенную мощность.

Повышение уровня мощности энергоблоков реализуется путем снятия инженерных запасов оборудования с учетом фактических характеристик, полученных в результате его изготовления, и модернизации систем и оборудования.

Важнейшим оборудованием энергоблоков АЭС с ВВЭР являются горизонтальные парогенераторы (ПГ), предназначенные для отвода тепла от теплоносителя первого контура и генерации сухого насыщенного пара. От эффективности ПГ в значительной степени зависят показатели работы энергоблока, в том числе его мощность. Одним из основных факторов определения приемлемости характеристик ПГ является качество генерируемого пара. Ухудшение качества пара, т.е. повышение его влажности и увеличение количества загрязняющих примесей, приводит к эрозионному износу турбинных лопаток. Качество генерируемого пара зависит от нескольких факторов, но в первую очередь от конструктивных особенностей ПГ и его сепарационных устройств.

Актуальность диссертационной работы заключается в расчетно-экспериментальном исследовании закономерностей процессов выравнивания паровой нагрузки зеркала испарения при использовании погруженного дырчатого листа (ПДЛ) неравномерной перфорации и разработке предложений для его применения в составе ПГ для повышения мощности новых разрабатываемых парогенераторов и парогенераторов действующих энергоблоков АЭС с ВВЭР.

**Целью работы** является определение закономерностей выравнивания паровой нагрузки зеркала испарения за счет применения погруженного дырчатого листа переменной перфорации. В соответствии с этой целью, в диссертации рассмотрены следующие задачи:

- 1) Обзор исследований гидродинамики погруженного дырчатого листа, направленных на достижение выравнивания паровой нагрузки;
- 2) Экспериментальное исследование выравнивающей способности ПДЛ на стенде ПГВ;
- 3) Валидация расчетного кода STEG на опытных данных, полученных на стенде ПГВ;
- 4) Усовершенствование математического описания течения двухфазного потока в объеме парогенератора, используемого в коде STEG;
- 5) Валидация усовершенствованного кода STEG. Расчетное исследование выравнивающей способности ПДЛ.

**Научная новизна.** В диссертационной работе:

1. Впервые выполнены экспериментальные исследования выравнивающей способности ПДЛ на стенде ПГВ;

2. Проведена валидация расчетного кода STEG на опытных данных, полученных на стенде ПГВ как для ПДЛ с равномерной перфорацией, так и для ПДЛ с неравномерной перфорацией;

3. Усовершенствована математическая модель кода STEG в части описания межфазного силового взаимодействия, гидросопротивления ПДЛ двухфазному потоку и внедрено уравнение межфазной поверхности;

4. Проведена валидация усовершенствованного кода STEG. С помощью этого кода выполнено расчетное исследование выравнивающей способности ПДЛ.

**Достоверность.** Опытные данные были получены на экспериментальной установке, построенной с использованием общепризнанных принципов моделирования. Экспериментальные исследования базировались на применении: проверенных методик исследований, метрологически аттестованных приборов, автоматизации выполнения экспериментов и обработки полученных результатов, расчетов погрешности измерений, а также программы качества. Результаты численных исследований основаны на использовании общепризнанных методов и подходов механики многофазных сред. Достоверность выполненных в работе усовершенствований математических моделей кода STEG подтверждается результатами их валидации на опытных данных.

**Практическая ценность** проведенного исследования состоит в том, что экспериментально-расчетным путем изучены закономерности двухфазной гидродинамики, определяющей эффективность выравнивания паровой нагрузки зеркала испарения с помощью ПДЛ неравномерной перфорации. В результате создан усовершенствованный и валидированный расчетный код STEG, позволяющий проводить практические расчеты с целью определения оптимальной конструкции ПДЛ неравномерной перфорации.

Все основные этапы исследования выполнялись по договору между ОАО ОКБ «Гидропресс» и ОАО «ЭНИЦ» № 02074-1 от 01.09.2010 и по двум государственным контрактам с Министерством образования и науки РФ (ГК № П491 от 13.05.2010 и ГК № П1091 от 31.05.2011). Отдельные вопросы были исследованы в рамках проекта РФФИ № 14-08-00388 и государственного задания №13.1544.2014/К Минобрнауки.

**Соответствие темы диссертации паспорту специальности.** Паспорт специальности 05.14.03 содержит формулировки «*В рамках специальности исследуются закономерности...тепловых и гидравлических процессов...протекающих в объектах ядерной техники...*», а также «*Исследования имеют целью совершенствование действующих и создание новых объектов ядерной техники, их оборудования, компонентов и систем...*». Тема диссертации соответствует этой формулировке.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментальных исследований на стенде ПГВ по гидравлическим сопротивлениям ПДЛ и выравняющей способности ПДЛ переменной перфорации;
2. Усовершенствованные математические модели кода STEG в части описания межфазного силового взаимодействия, гидросопротивления ПДЛ двухфазному потоку, а также внедренное в код STEG уравнение переноса межфазной поверхности;
3. Результаты валидации усовершенствованного кода STEG на опытных данных экспериментов на стенде ПГВ с ПДЛ равномерной и неравномерной перфорациями;
4. Результаты расчетного исследования выравняющей способности ПДЛ с помощью усовершенствованного и валидированного кода STEG.

**Личный вклад автора:**

1. Определение режимных параметров, разработка сценариев экспериментов на стенде ПГВ по исследованию двухфазной гидродинамики погруженного дырчатого листа постоянной и переменной перфорации и выполнение экспериментов, обработка опытных данных, определение влияния объемного паросодержания на гидросопротивление погруженного дырчатого листа;
2. Разработка усовершенствованных математических моделей кода STEG в части описания межфазного силового взаимодействия и гидросопротивления ПДЛ двухфазному потоку. Внедрение в код STEG уравнения переноса межфазной поверхности;
3. Валидация усовершенствованного кода STEG на экспериментальных данных, полученных на стенде ПГВ;
4. Расчетный анализ усовершенствованным кодом STEG влияния переменной перфорации ПДЛ на выравнивание паровой нагрузки. Предложены рекомендации по степени перфорации ПДЛ вдоль его длины.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 18-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов МЭИ (Россия, г.Москва, 2012), 19-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов МЭИ (Россия, г.Москва, 2013), 20-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов МЭИ (Россия, г.Москва, 2014), 9-ой международной конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР (Россия, г.Подольск, 2015), научно-технической конференции "Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика-2015)" (Россия, г. Обнинск, 2015), а также на семинарах Отделения теплофизики Электрогорского научно-исследовательского центра по безопасности АЭС.

**Публикации.** Основные результаты работы опубликованы в 15 статьях, в том числе в семи статьях в журналах из списка ВАК: «Теплоэнергетика», «Теплофизика высоких температур», «Фундаментальные исследования», «Вестник МЭИ».

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит введение, 5 глав, результаты и выводы, список литературы из 122 использованных источников. Диссертация выполнена на 199 листах, включая 26 таблиц и 68 рисунков.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность проведенных в диссертации исследований, определены цели и задачи работы и дана общая постановка решаемых в диссертации задач.

**В первой главе** выполнен обзор исследований двухфазной гидродинамики, связанной с функционированием погруженного дырчатого листа в составе парогенератора. Анализ обзора этих исследований показывает, что применение ПДЛ позволяет существенно снизить остаточную неравномерность паровой нагрузки на зеркале испарения. Одним из способов дальнейшего снижения остаточной неравномерности паровой нагрузки на зеркале испарения, необходимого для повышения мощности парогенератора, является применение ПДЛ неравномерной перфорации. Сделан вывод о необходимости экспериментально-расчетных исследований с целью определения закономерностей выравнивания паровой нагрузки ПДЛ неравномерной перфорации и их применения для расчетов таких ПДЛ.

**Во второй главе** представлено описание стенда ПГВ (ЭНИЦ), его системы измерений, методики определения погрешностей и результатов экспериментальных исследований гидросопротивления и выравнивающей способности ПДЛ с равномерной и неравномерной перфорацией.

Стенд ПГВ был разработан для исследования процессов гидродинамики и сепарации пара в горизонтальном парогенераторе. Экспериментальная модель размещена вдоль горизонтальной оси сосуда высокого давления (Рис.1). Длина нижней части модели 2370 мм, ширина модели 100 мм. Вертикальные размеры модели приняты равными натурным.

Сепарационная схема модели включает в себя основные элементы сепарационной схемы натурального парогенератора: погруженный дырчатый лист расположен в нижней части модели, пароприемный дырчатый щит расположен в верхней части модели. Использовались два варианта ПДЛ с равномерной перфорацией и неравномерной перфорацией. Степень перфорации ПДЛ указана в таблице 1.

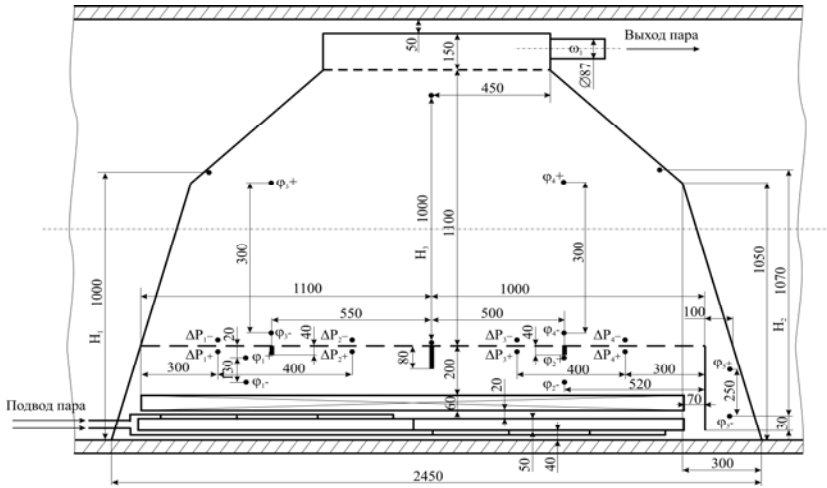


Рис. 1 – Модель (поперечная вырезка) парогенератора ПГВ-1000

Табл. 1. Степень перфорации ПДЛ

Перфорация ▼	«Горячая» сторона ПДЛ	Холодная сторона ПДЛ
Равномерная	5,7 %	5,7 %
Неравномерная	4,1 %	8,3 %

Один торец («левый») ПДЛ примыкает к корпусу СВД, второй имеет закраину. Закраина и корпус модели образуют зазор, ширина которого составляет 100 мм, через который осуществляется слив воды с ПДЛ. В этой же зоне стенка корпуса модели не доходит до днища СВД на 3 – 4 мм для сообщения между собой объемов внутри модели и в корпусе СВД.

Пароприемный дырчатый щит (ППДЩ) модели перфорирован отверстиями  $\varnothing 10$  мм, его перфорация равномерная, относительное живое сечение 4.5%. Для обеспечения в модели ПГ изменения скорости пара по высоте парового объема такого же, как в натурном ПГ, паровой объем модели спрофилирован соответственно профилю корпуса натурального ПГ. Конструктивная высота парового объема (расстояние между ПДЛ и ППДЩ) в модели составляет 1100 мм, что практически соответствует натурной высоте парового объема ПГ, принятой в проекте ПГВ равной 1150 мм.

В нижней части модели на расстоянии 200 мм от ПДЛ расположен имитатор трубного пучка, состоящий из трех рядов трубок наружным диаметром 16 мм. Расположение труб в имитаторе пучка коридорное. Вертикальный шаг между трубками – 22 мм, горизонтальный – 24 мм. На расстоянии 20 мм от нижнего ряда трубок имитатора теплообменного пучка расположен прямоугольный коллектор для подачи пара в модель. Паровой коллектор имеет равномерную перфорацию по длине для выхода пара, он разделен с помощью перегородки на «горячую» и «холодную» половины с раздельной подачей греющего пара.

В верхней части модели расположен коллектор отвода пара, на боковой стенке коллектора находится патрубок отвода пара.

Экспериментальная установка работает следующим образом. При заданном значении уровня в модели подводимый пар охлаждается в смесителе и с небольшим перегревом подается в парораздающий коллектор, расположенный в нижней части модели. Пар из парораздающего коллектора барботирует через имитатор трубного пучка и поступает в пространство под ПДЛ. В пространстве под ПДЛ пар растекается и через отверстия в ПДЛ поступает в двухфазный слой над ПДЛ и далее в паровой объем модели. В паровом объеме пар сепарируется, поступает через отверстия ППДЩ в коллектор и далее в сбросной трубопровод модели. Вода, вынесенная паром через отверстия ПДЛ отводится в закраину между корпусом модели и закраиной ПДЛ.

Для определения величин истинного объемного паросодержания под ПДЛ в двух зонах на "горячей" и "холодной" сторонах используется гидростатический метод.

Определение выравнивающей способности листов ПДЛ выполняется с помощью измерения перепада давления ПДЛ по его длине в четырех точках ( $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3, \Delta P_4$ ) с отборами над и под ПДЛ.

Расход пара измеряется в каждой из двух линий на входе в модель и в выходном патрубке сосуда высокого давления с помощью стандартных сужающих устройств и дифманометров.

Величины  $\varphi$  под ПДЛ  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  измеряются на расстоянии 20 мм и 40 мм от ПДЛ соответственно, расстояние между отборами 130 мм, перепад давления измеряется дифманометрами типа "Fuji". Величина истинного объемного паросодержания над ПДЛ  $\varphi_3$  и  $\varphi_4$  измеряется в центре пластин модели. От ПДЛ расстояние до нижних отборов 50 мм, расстояние между нижним и верхним отборами по высоте равно 300 мм.

Давление и температура в сосуде высокого давления измеряется в паропроводе выхода пара из сосуда высокого давления. Автоматическая система сбора научной информации (АСНИ) стенда ПГВ с частотой 1 Гц производила запись показаний всех датчиков на персональный компьютер.

Были выполнены экспериментальные режимы с равномерной подачей пара на ПДЛ с равномерной перфорацией при различных расходах пара.

На основе полученных опытных данных, определены гидравлические сопротивления ПДЛ при различных расходах подаваемого пара и получена поправка на двухфазность. Установлено, что коэффициент  $\Psi$ , характеризующий поправку на двухфазность потока, практически во всем исследуемом диапазоне параметров меньше единицы. Это означает, что гидросопротивление ПДЛ двухфазному потоку для гидродинамических условий его работы в парогенераторе меньше, чем гидросопротивление ПДЛ однофазному потоку пара такого же расхода. Это, видимо, связано с образованием пленки жидкости на нижней поверхности ПДЛ, которая увлекается паром внутрь отверстий и, тем самым, сглаживает острые кромки



отверстий. Это приводит к уменьшению гидросопротивления ПДЛ. На основе обработки получена зависимость коэффициента  $\Psi$  от объемного паросодержания под ПДЛ.

$$\Psi = 1,64 - 1,18 \cdot \bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}} \quad (1)$$

Были проведены экспериментальные режимы с неравномерной подачей пара как для ПДЛ с равномерной перфорацией (5,7%), так и для ПДЛ с неравномерной перфорацией (4,1% на «горячей» половине ПДЛ и 8,3% на «холодной»). При этом, использовались два соотношения расходов пара, подаваемых на горячую и холодную стороны («3:1» и «2:0»). На Рис.2 показаны полученные распределения перепадов давления на ПДЛ вдоль его длины для ПДЛ с неравномерной перфорацией при различных весовых уровнях над ПДЛ.

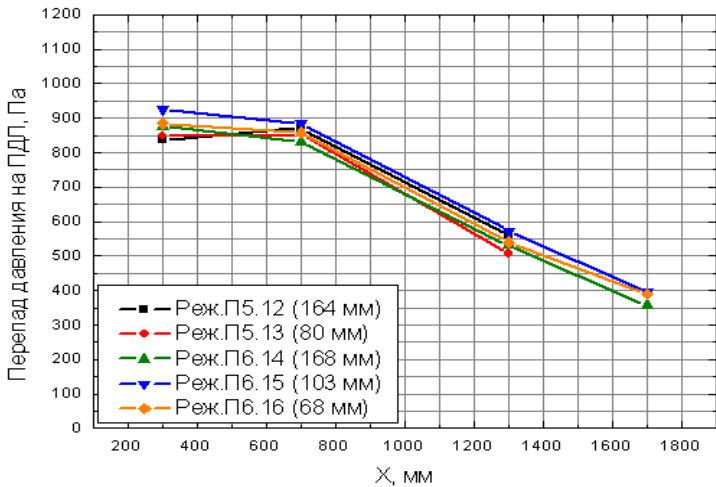


Рис. 2 – Распределение перепадов давления на ПДЛ вдоль его длины для ПДЛ с неравномерной перфорацией

На основе полученных опытных данных выполнена оценка выравнивающей способности ПДЛ. Показано, что обработка опытных данных приводит к выводу – при переходе от равномерной перфорации дырчатого листа к неравномерной выравнивающая способность ПДЛ усиливается.

Получено, что коэффициент выравнивания  $k_{\text{ПДЛ}}$  (характеризующий выравнивающее действие ПДЛ, см. Табл.2) для режимов подачи пара «3:1» при использовании ПДЛ с неравномерной перфорацией становится близким к единице, что означает полное выравнивание расхода пара по всему сечению ПДЛ, а для режима подачи пара «2:0»  $k_{\text{ПДЛ}} \approx 0,75$ , см. Табл.2.

Табл. 2 – Коэффициент выравнивания ПДЛ  $k_{\text{ПДЛ}}$ 

Режим	ПДЛ	$k_{\text{ПДЛ}} = 1 - \frac{G_{\text{гор,ПДЛ}} - G_{\text{хол,ПДЛ}}}{G_{\text{гор,вход}} - G_{\text{хол,вход}}}$
Подача пара «3:1»	с равномерной перфорацией	0,23
	с неравномерной перфорацией	1,05
Подача пара «2:0»	с равномерной перфорацией	0,355
	с неравномерной перфорацией	0,755

В табл. 2  $G_{\text{гор,вход}}$ ,  $G_{\text{хол,вход}}$  – подаваемые расходы на «горячую» и «холодную» стороны модели,  $G_{\text{гор,ПДЛ}}$ ,  $G_{\text{хол,ПДЛ}}$  – расходы пара через «горячую» и «холодную» стороны ПДЛ.

**В третьей главе** дано описание кода STEG, предназначенного для численного моделирования теплогидравлических процессов во втором контуре горизонтального парогенератора.

Код STEG основан на двухскоростном двухтемпературном трехмерном описании движения пароводяной смеси, при этом для анализа межфазного взаимодействия используется карта режимов течения двухфазного потока. Численное интегрирование определяющих уравнений осуществляется с помощью полуневяной численной схемы. Основная область применения кода STEG – трехмерное численное моделирование течения пароводяной смеси во втором контуре горизонтального парогенератора АЭС с ВВЭР.

Расчеты экспериментов на стенде ПГВ исходной версией кода STEG показали существенное расхождение расчетных и экспериментальных результатов. В связи с этим была проведена большая работа по совершенствованию моделей кода STEG, позволившая существенно улучшить согласие расчетных и экспериментальных результатов.

**Четвертая глава** посвящена усовершенствованию математического описания течения двухфазного потока в объеме парогенератора, используемого в коде STEG.

Анализ чувствительности результатов расчетов к параметрам моделей кода показал, что результаты наиболее чувствительны к изменениям в моделях межфазного трения. С целью улучшения согласия экспериментальных и расчетных результатов в коде STEG была реализована возможность изменения силы межфазного сопротивления в заданном диапазоне паросодержаний на заданную величину в заданной части

расчетной области. Для этого сначала определялся коэффициент сопротивления  $C_i$  с помощью той или иной модели, который затем пересчитывался в зависимости от величины объемного паросодержания в рассматриваемой точке. При этом использовалась параболическая корректирующая функция:

$$\frac{C_{i,\text{mod}}}{C_i} = 1 - A \left\{ 1 - \left[ \frac{\varphi - 0,5(\psi_l + \psi_r)}{0,5(\psi_r - \psi_l)} \right]^2 \right\}$$

Область изменения  $C_i$ :  $\psi_l < \varphi < \psi_r$

Параметр  $A$  определяет масштаб и направление изменения:

если  $0 < A < 1$ , то  $C_{i,\text{mod}} < C_i$

если  $A < 0$ , то  $C_{i,\text{mod}} > C_i$

Введение корректирующей функции для межфазного сопротивления потребовало определения ее параметров. На первом этапе определения параметров выполнялись вариантыные расчеты экспериментальных режимов с равномерной перфорацией ПДЛ и с равномерной подачей пара.

При выполнении этих расчетов перепад давления на ПДЛ моделировался следующим образом.

$$\Delta P_{\text{ПДЛ}} = \xi \cdot \frac{\rho''(w''_{\text{отв}})^2}{2}$$

где  $w''_{\text{отв}}$  – скорость пара в отверстиях. В качестве коэффициента гидравлического сопротивления ПДЛ  $\xi$  использовались его экспериментальные значения, полученные в результате обработки опытных данных экспериментов режимов, выполненных на стенде ПГВ.

В ходе расчетов варьировались параметры  $A$ ,  $\psi_l$ ,  $\psi_r$  с целью получения наилучшего совпадения с экспериментальными данными по паросодержаниям. В качестве мер расхождения экспериментальных и расчетных результатов использовались два критерия:

- коэффициент стохастической аппроксимации (SAR);
- среднее по всем датчикам отклонение по паросодержанию (CO).

В качестве базовой модели межфазного сопротивления, параметры которой варьировались, была выбрана модель [Simovic Z.R. et al., 2007].

Расчеты, проведенные на данном этапе исследований, показали необходимость введения двух различных модификаций межфазного сопротивления:

- 1) в области выше ПДЛ,
- 2) в области ниже ПДЛ,

отражающих разную физическую природу двухфазных течений в этих областях.

На основе большого количества параметрических расчетов установлены параметры, обеспечивающие наилучшее совпадение объемных

паросодержаний при экспериментальных значениях коэффициента гидросопротивления ПДЛ.

Таким образом установлено, что в области над ПДЛ модель межфазного сопротивления [Simovic Z.R. et.al., 2007] существенно завышает межфазное сопротивление. Видимо, это связано с тем, что пузырьки пара после прохождения ПДЛ проходят значительное расстояние в следе друг друга, что вызывает уменьшение межфазного сопротивления, не учитываемое в [Simovic Z.R. et.al., 2007].

В области под ПДЛ двухфазные течения имеют сложный двухмерный характер, вызванный, с одной стороны, восходящим течением пара, а с другой стороны – поперечным перетеканием двухфазного потока с «горячей» стороны на «холодную» вследствие различного гидросопротивления ПДЛ на «горячей» и «холодной» половинах. При этом в области между верхней кромкой трубного пучка и ПДЛ существенно меняется величина объемного паросодержания. Модель [Simovic Z.R. et.al., 2007] основана на рассмотрении для данного случая эмульсионного режима течения двухфазной среды, что, видимо, недостаточно для описания рассматриваемого случая и потребовала своей модификации.

Была усовершенствована модель гидросопротивления ПДЛ двухфазному потоку – в код STEG была внедрена формула (1).

Также в код STEG была внедрена модель переноса концентрации площади межфазной поверхности для пузырькового режима течения. Модель была выбрана на основе анализа литературы и валидирована на доступных экспериментальных данных.

**Пятая глава** диссертация посвящена описанию валидации усовершенствованной версии кода STEG на экспериментальных данных стенда ПГВ, анализу экспериментов по выравнивающей способности ПДЛ с помощью усовершенствованной версии кода STEG и результатам демонстрационных расчетов натурального парогенератора с ПДЛ переменной перфорации.

На Рис. 3–4 показаны типичные картины сравнения расчетных и экспериментальных параметров при выполнении валидационных расчетов.

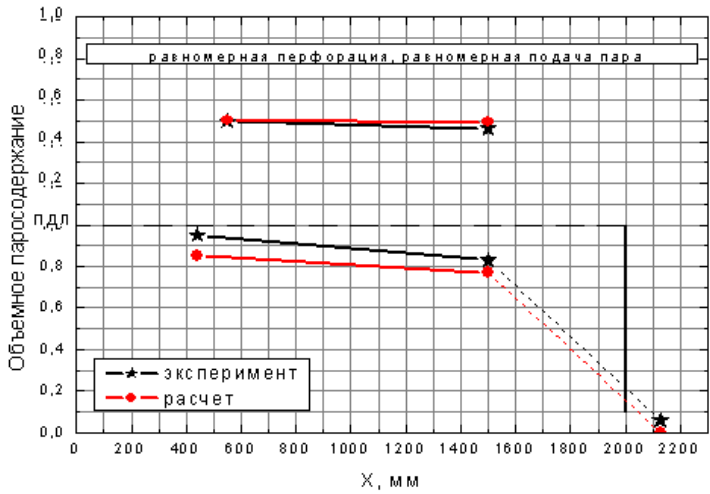


Рис. 3 – Расчетные и экспериментальные паросодержания в режиме П1.4

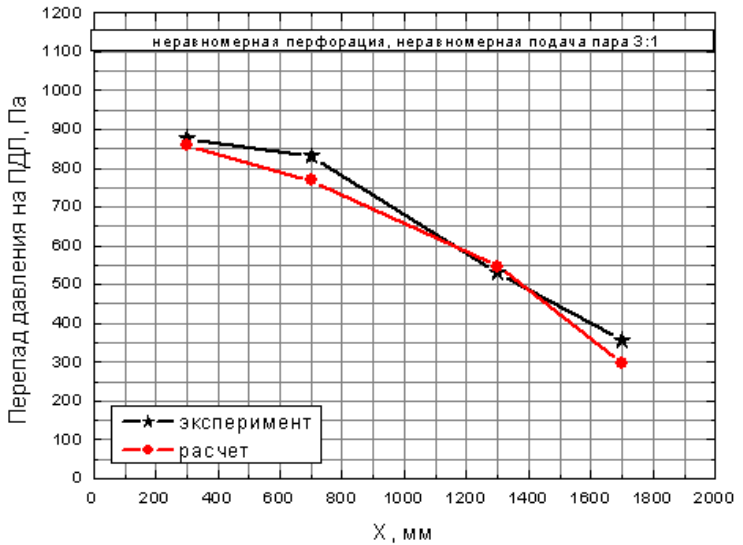


Рис. 4 – Расчетные и экспериментальные перепады давления в режиме П6.14

Для количественной оценки валидации кода STEG (мера расхождения экспериментальных и расчетных результатов) были использованы следующие критерии:

- **SAR\_φ** – коэффициент стохастической аппроксимации для объемного паросодержания;
- **SAR\_DP01-4** – коэффициент стохастической аппроксимации для перепадов давления на ПДЛ;
- **CO\_φ** – среднее по всем датчикам отклонение по паросодержанию;
- **CO DP01-4** – среднее по всем датчикам относительное отклонение по перепадам давления на ПДЛ.

Полное совпадение расчетных и опытных данных соответствует

$$\text{SAR}_\phi = \text{SAR}_{\text{DP01-4}} = 1$$

$$\text{CO}_\phi = \text{CO}_{\text{DP01-4}} = 0$$

В Табл.3 приводятся средние значения коэффициентов стохастической аппроксимации и среднего отклонения для проанализированных режимов. На основании данных результатов можно сделать заключение о приемлемом совпадении опытных и расчетных данных.

Табл. 3 – Средние значения коэффициентов стохастической аппроксимации и среднего отклонения

Параметр	Все режимы	Практически значимые режимы ( $G > 7$ т/ч, $L03 > 0,12$ м)
SAR_φ	0,83-0,91	0,86-0,91
SAR_DP01-4	0,71-0,93	0,80-0,93
CO_φ	0,03-0,07	0,03-0,06
CO DP01-4	0,06-0,36	0,06-0,15

С помощью усовершенствованной версии кода STEG был выполнен анализ экспериментов по выравнивающей способности ПДЛ, который позволил получить дополнительную информацию по закономерностям выравнивания паровой нагрузки.

При этом количественные характеристики выравнивающей способности ПДЛ характеризовались с помощью коэффициента выравнивания, характеризующего интегральное перераспределение потока пара после ПДЛ (перетекание пара с горячей стороны на холодную) и коэффициента остаточной неравномерности, характеризующего максимальное отклонение локальной приведенной скорости пара на ПДЛ от средней скорости пара на зеркале испарения.

Результаты количественной оценки выравнивающей способности ПДЛ с помощью усовершенствованной версии кода STEG для режимов с подачей пара «3:1» приводятся в Табл.4.

Табл. 4 – Выравнивающая способность ПДЛ

	Равн. перф. 5,7%, Подача пара 3:1		Неравн. перф. (4,1%, 8,3%) Подача пара 3:1		
	П4.2	П4.3	П6.14	П6.15	П6.16
Режим					
Ггор,вход, кг/с	1,49	1,49	1,51	1,48	1,47
Гхол,вход, кг/с	0,51	0,51	0,53	0,51	0,51
Ггор,пдл, кг/с	1,24	1,29	0,92	0,98	1,06
Гхол,пдл, кг/с	0,76	0,71	1,11	1,00	0,92
Коэф. Выравнивания	<b>0,51</b>	<b>0,40</b>	<b>1,20</b>	<b>1,02</b>	<b>0,85</b>
Коэф.ост. неравн.	<b>1,28</b>	<b>1,36</b>	<b>1,87</b>	<b>1,70</b>	<b>1,66</b>

Анализ результатов перехода с равномерной перфорации на неравномерную позволяет сделать следующие выводы.

1. Коэффициент выравнивания ПДЛ увеличивается примерно в 2 раза (с  $\sim 0,5$  до  $\sim 1,0$ ), то есть ПДЛ с неравномерной перфорацией обеспечивает лучшее интегральное выравнивание (суммарный расход с горячей половины примерно равен суммарному расходу с холодной половины).

2. Коэффициент остаточной неравномерности увеличивается примерно на 30% (с  $\sim 1,3$  до  $\sim 1,7$ ), то есть в случае ПДЛ с неравномерной перфорацией ухудшается сепарация пара из-за высоких локальных значений скорости пара.

Причина увеличения коэффициента остаточной неравномерности заключается в следующем. Во-первых, горячая сторона ПДЛ (перфорация 4,1%) частично «запирает» пар, заставляя его значительную часть двигаться на холодную сторону ПДЛ (перфорация 8,3%). Во-вторых, достигнув холодной стороны ПДЛ с высокой степенью перфорации (перфорация 8,3%), поток сразу же устремляется вверх, вследствие уменьшения гидросопротивления ПДЛ.

Общая картина распределения скоростей пара и истинного объемного паросодержания для случая ПДЛ переменной перфорацией показана на Рис.5, на котором выделена область выброса пара в середине ПДЛ вблизи границы листов с различной перфорацией.

В результате анализа экспериментов на стенде ПГВ с помощью усовершенствованного кода STEG было установлено, что переход с равномерной перфорации на неравномерную, с одной стороны, обеспечивает лучшее интегральное выравнивание, но с другой стороны, при этом ухудшается сепарация пара из-за высоких локальных значений скорости пара вблизи границы смыкания пластин с разной степенью перфорации.

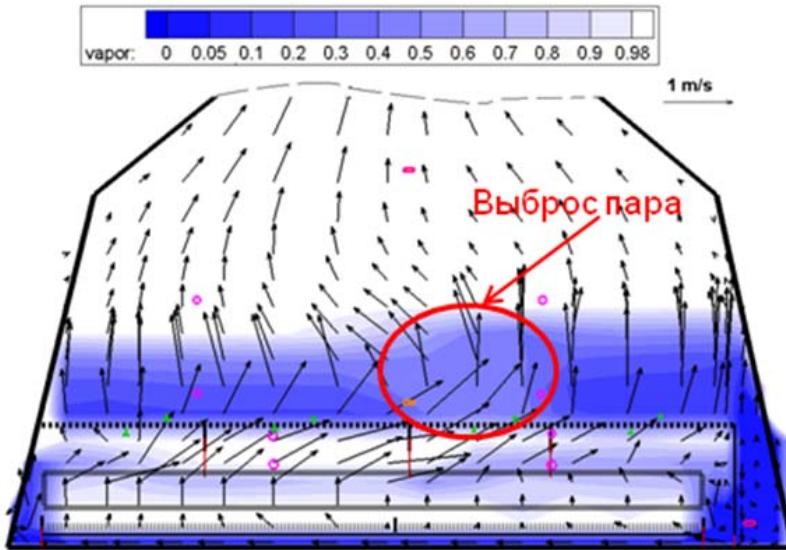


Рис. 5 – Распределения скорости пара и объемного паросодержания.  
Неравномерная подача пара 3:1 (Неравномерная перфорация ПДЛ 4,1% и 8,3%)

Были выполнены демонстрационные расчеты натурального парогенератора с ПДЛ переменной перфорации. В качестве объекта исследования был взят парогенератор ПГВ-1000М, в котором раздача питательной воды осуществлялась по реконструированной схеме водопитания и продувки ПГВ-1000М, согласно которой ликвидируется часть раздающих коллекторов со стороны холодного торца и устанавливаются дополнительные раздающие коллекторы со стороны горячего торца, при этом отбор непрерывной продувки осуществляется из солевого отсека у холодного торца парогенератора.

Были выполнены два расчета: 1) ПДЛ с равномерной перфорацией 7,8% и 2) ПДЛ переменной перфорации. Параметры и зоны ПДЛ переменной перфорации, показанные на Рис.6, были выбраны на основании работы [Трунов Н.Б., Сотсков В.В. и др, 2006].

Остаточную неравномерность паровой нагрузки характеризует приведенная скорость пара после ПДЛ. Приведенная скорость пара на выходе из ПДЛ, полученная в расчетах, была усреднена по каждой отдельной зоне. На Рис.6 показаны получившиеся значения средней приведенной скорости в каждой зоне для ПДЛ равномерной перфорации 7,8% и ПДЛ переменной перфорации.



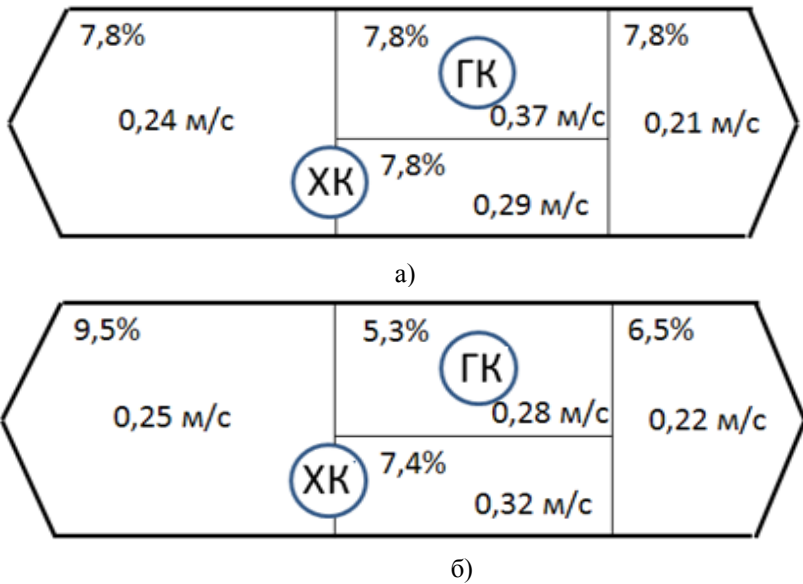
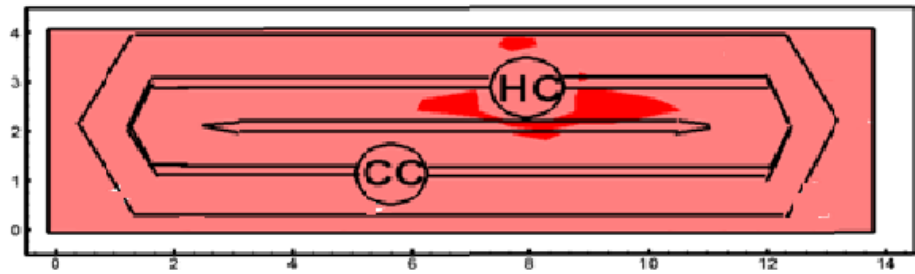


Рис. 6 – Средняя приведенная скорость по зонам для ПДЛ равномерной перфорации 7,8% (а) и ПДЛ переменной перфорацией (б)

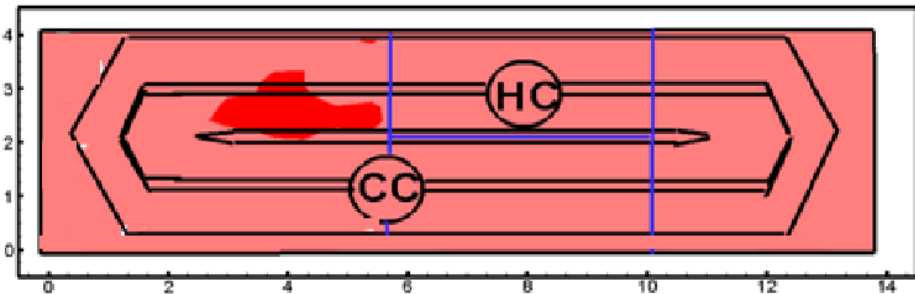
Из Рис.6 следует, что использование ПДЛ переменной перфорации в среднем улучшает выравнивание паровой нагрузки, как это ранее было установлено при анализе экспериментов на стенде ПГВ. Однако при анализе локальной приведенной скорости пара по сечению ПДЛ ситуация существенно меняется.

На Рис.7 показаны распределения приведенной скорости пара по ПДЛ для ПДЛ равномерной перфорации и ПДЛ переменной перфорации. На Рис.7 на фоне розового цвета выделены ярко-красным цветом области повышенной паровой нагрузки (приведенная скорость более 0,4 м/с). Для случая ПДЛ равномерной перфорации зона повышенной паровой нагрузки находится, как и можно было ожидать, в зоне №1 в районе горячего коллектора. Однако, при переходе к ПДЛ переменной перфорации область повышенной паровой нагрузки не исчезает, как можно было предположить, исходя из Рис.6, а сдвигается в сторону холодного торца (зона №3). Этот сдвиг обусловлен сложными двухфазными гидродинамическими течениями, обусловленными как неравномерностью подвода пара из области трубочатки, так и переменностью перфорации ПДЛ. Таким образом, при переходе к ПДЛ переменной перфорации распределение средней паровой нагрузки по зонам улучшается, но область повышенной паровой нагрузки на ПДЛ не уменьшается, а перемещается в сторону холодного торца.

Выполненные методические расчеты с уменьшением степени перфорации для зоны №3 до 7,5% показали, что зоны повышенной паровой нагрузки практически исчезают.



а)



б)

Рис. 7 – Области повышенной паровой нагрузки на ПДЛ (выделены ярко-красным цветом) а) ПДЛ с равномерной перфорацией, б) ПДЛ с неравномерной перфорацией

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе проведенного анализа литературы показано, что одним из способов дальнейшего снижения остаточной неравномерности паровой нагрузки на зеркале испарения, необходимого для повышения мощности парогенератора, является применение ПДЛ неравномерной перфорации.

2. Выполнены экспериментальные исследования гидросопротивления и выравнивающей способности ПДЛ с равномерной и неравномерной перфорацией на стенде ПГВ (ЭНИЦ). Установлено, что гидросопротивление ПДЛ двухфазному потоку для гидродинамических условий его работы в парогенераторе меньше, чем гидросопротивление ПДЛ

однофазному потоку пара такого же расхода. Установлена зависимость коэффициента  $\Psi$ , характеризующего поправку на двухфазность потока, от объемного паросодержания под ПДЛ. Выполнена оценка выравнивающей способности ПДЛ для двух соотношений расходов пара, подаваемых на горячую и холодную стороны («3:1» и «2:0»). Показано, что обработка опытных данных приводит к выводу – при переходе от равномерной перфорации дырчатого листа к неравномерной выравнивающая способность ПДЛ усиливается.

3. С целью улучшения совпадения результатов расчетов кодом STEG с опытными данными была проведена модификация модели межфазного сопротивления; разработаны новые корреляции для расчета гидросопротивления ПДЛ, учитывающие объемное паросодержание под ПДЛ; выбрана модель переноса концентрации площади межфазной поверхности для пузырькового режима течения, которая была валидирована на доступных экспериментальных данных. Была проведена валидация усовершенствованной версии кода STEG на экспериментальных данных стенда ПГВ, показавшая приемлемое совпадение опытных и расчетных данных.

4. Выполнен анализ экспериментов по выравнивающей способности ПДЛ с помощью усовершенствованной версии кода STEG. Установлено, что переход с равномерной перфорации на неравномерную, с одной стороны, обеспечивает лучшее интегральное выравнивание, но с другой стороны, при этом ухудшается сепарация пара из-за высоких локальных значений скорости пара вблизи границы смыкания пластин с разной степенью перфорации.

5. Выполнены демонстрационные расчеты натурального парогенератора с ПДЛ переменной перфорации, которые также подтвердили выводы, представленные в п.4. Расчетным анализом показана возможность

улучшения выравнивающего эффекта ПДЛ при использовании листов с различной перфорацией.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ  
ДИССЕРТАЦИИ

1. Блинков В.Н., Елкин И.В., Емельянов Д.А., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Неровнов А.А., Никонов С.М., Парфенов Ю.В. Влияние объемного паросодержания на гидравлическое сопротивление погруженного дырчатого листа // Теплоэнергетика, 2015, №7, с. 24–29.
2. Блинков В.Н., Елкин И.В., Емельянов Д.А., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Неровнов А.А., Никонов С.М., Парфенов Ю.В. Влияние неравномерной перфорации погруженного дырчатого листа на выравнивание паровой нагрузки на зеркале испарения парогенератора ВВЭР // Теплоэнергетика, 2016, №1, С. 54–58.
3. Емельянов Д.А., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Никонов С.М., Парфенов Ю.В. Экспериментально-расчетное исследование выравнивающей способности погруженного дырчатого листа переменной перфорации // Фундаментальные исследования, 2014, № 12, с. 90-94.
4. Асмолов В.Г., Блинков В.Н., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В., Емельянов Д.А., Киселев А.Е., Долганов К.С. Современное состояние и тенденции развития системных теплогидравлических кодов за рубежом // Теплофизика высоких температур, 2014, т. 52, №1, с. 105-117.
5. Емельянов Д.А., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Никонов С.М. Исследование двухфазной гидродинамики погруженного дырчатого листа // Фундаментальные исследования, 2014, № 11, с. 56-60.
6. Емельянов Д.А., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В. Разработка и валидация расчетного кода для моделирования пузырьковых течений на основе двухскоростной двухтемпературной модели с уравнением переноса межфазной поверхности // Фундаментальные исследования, №6 , 2013, с. 319 – 322.
7. Блинков В.Н., Мелихов О.И., Мелихов В.И., Парфенов Ю.В., Никонов С.М., Неровнов А.А., Емельянов Д.А. Расчетное исследование выравнивающей способности погруженного дырчатого листа переменной перфорации в горизонтальном парогенераторе с помощью кода STEG // Вестник МЭИ, №6, 2016, с. 38 – 43.
8. Мелихов О.И., Мелихов В.И., Никонов С.М., Парфенов Ю.В., Емельянов Д.А., Неровнов А.А."Валидация и усовершенствование кода STEG на основе экспериментальных данных, полученных на стенде ПГВ.

Расчетный анализ экспериментов на стенде ПГВ», Сборник трудов 9-ой международной конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 19-22 мая 2015 года, Россия, Подольск, СД.

9. Мелихов О.И., Елкин И.В., Мелихов В.И., Никонов С.М., Парфенов Ю.В., Емельянов Д.А., Неровнов А.А. "Экспериментальные исследования гидросопротивления и выравнивающей способности ПДЛ на стенде ПГВ (ЭНИЦ)", Сборник трудов 9-ой международной конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 19-22 мая 2015 года, Россия, Подольск, СД.

10. Мелихов О.И., Мелихов В.И., Никонов С.М., Парфенов Ю.В., Емельянов Д.А., Неровнов А.А. "Расчетное моделирование экспериментов по исследованию выравнивающей способности ПДЛ, выполненное с помощью усовершенствованного кода STEG", Сборник тезисов докладов на научно-технической конференции "Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика-2015)", 06-09 октября 2015 года, Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2015, С. 228-229.

11. Мелихов О.И., Елкин И.В., Мелихов В.И., Никонов С.М., Парфенов Ю.В., Емельянов Д.А., Неровнов А.А. "Экспериментальные исследования двухфазной гидродинамики ПДЛ на стенде ПГВ", Сборник тезисов докладов на научно-технической конференции "Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика-2015)", 06-09 октября 2015 года, Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2015, С. 71-72.

12. Мелихов О.И., Елкин И.В., Мелихов В.И., Никонов С.М., Парфенов Ю.В., Неровнов А.А., Емельянов Д.А. Экспериментальные исследования гидросопротивления и выравнивающей способности ПДЛ на стенде ПГВ // Научно-технический отчет АО «ЭНИЦ» за 2012-2015 гг. 2015, с.31-47.

13. Мелихов О.И., Мелихов В.И., Никонов С.М., Парфенов Ю.В., Неровнов А.А., Емельянов Д.А. Валидация и усовершенствование кода STEG на основе экспериментальных данных, полученных на стенде ПГВ. Расчетный анализ экспериментов на стенде ПГВ // Научно-технический отчет АО «ЭНИЦ» за 2012-2015 гг. 2015, с.222-233.

14. Мелихов О.И., Мелихов В.И., Никонов С.М., Парфенов Ю.В., Емельянов Д.А., Неровнов А.А. Расчетное моделирование экспериментов по исследованию выравнивающей способности ПДЛ, выполненное с помощью усовершенствованного кода STEG // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2016, выпуск 2, с. 187-199.

15. Мелихов О.И., Елкин И.В., Мелихов В.И., Никонов С.М., Парфенов Ю.В., Емельянов Д.А., Неровнов А.А. Экспериментальные исследования двухфазной гидродинамики ПДЛ на стенде ПГВ (ЭНИЦ). // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2016, выпуск 2, с. 172-186.



Емельянов Дмитрий Алексеевич

Исследование выравнивания паровой нагрузки в горизонтальном  
парогенераторе ВВЭР с помощью дырчатого листа

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 12.04.2017  
Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 110 экз.  
Печать на аппарате Rex-Rotary. ИБРАЭ РАН.  
115191, Москва, ул. Б.Тулльская, 52  
Телефон: 8-495-955-22-66