

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

*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*

**ДИССЕРТАЦИЯ**

*на соискание ученой степени кандидата технических наук*

Научный руководитель  
д.ф-м.н., профессор  
Мелихов Олег Игорьевич

Москва – 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ .....	2
ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	9
ГЛАВА 1        ОБЗОР        ИССЛЕДОВАНИЙ        ГИДРОДИНАМИКИ ПОГРУЖЕННОГО ДЫРЧАТОГО ЛИСТА, НАПРАВЛЕННЫХ НА ДОСТИЖЕНИЕ ВЫРАВНИВАНИЯ ПАРОВОЙ НАГРУЗКИ.....	17
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1: .....	51
ГЛАВА 2        ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ        ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫРАВНИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПДЛ НА СТЕНДЕ ПГВ.....	52
2.1    Краткое описание экспериментального стенда ПГВ .....	52
2.2    Экспериментальное определение гидравлического сопротивления ПДЛ        61	
2.2.1    Описание экспериментальных режимов с равномерной подачей пара и ПДЛ равномерной перфорации .....	61
2.2.2    Определение гидравлического сопротивления ПДЛ .....	73
2.3    Экспериментальное исследование выравнивающей способности ПДЛ        91	
2.3.1    Описание экспериментальных режимов с различной подачей пара на горячую и холодную стороны (отношение расходов «3:1»)        91	
2.3.2    Описание экспериментальных режимов с подачей пара на горячую сторону (отношение расходов «2:0») .....	97
2.3.3    Анализ экспериментальных режимов с различной подачей пара на горячую и холодную стороны (отношение расходов «3:1»).....	104

2.3.4 Анализ экспериментальных режимов с подачей пара на горячую сторону (отношение расходов «2:0») .....	112
2.3.5 Анализ полученных результатов по оценке выравнивающей способности ПДЛ.....	117
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 .....	118
ГЛАВА 3 ВАЛИДАЦИЯ РАСЧЕТНОГО КОДА STEG НА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ НА СТЕНДЕ ПГВ .....	120
3.1 Описание кода STEG .....	120
3.1.1 Математическая модель кода STEG .....	120
3.2 Результаты валидации кода STEG на опытных данных, полученных на стенде ПГВ.....	132
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 .....	134
ГЛАВА 4 УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ОБЪЕМЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В КОДЕ STEG .....	135
4.1 Усовершенствование описания межфазного сопротивления .....	135
4.2 Усовершенствование модели гидросопротивления ПДЛ двухфазному потоку .....	141
4.3 Внедрение уравнения переноса межфазной поверхности.....	142
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 .....	151
ГЛАВА 5 ВАЛИДАЦИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО КОДА STEG. РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫРАВНИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПДЛ	152
5.1 Валидация усовершенствованного расчетного кода STEG на опытных данных, полученных на стенде ПГВ.....	152

5.2	Расчетное исследование выравнивающей способности ПДЛ.....	164
5.3	Демонстрация применения усовершенствованного кода STEG для исследования выравнивающей способности ПДЛ в натурном парогенераторе	171
5.3.1	Параметры для расчетов теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе ПГВ-1000М в номинальном режиме для ПДЛ с равномерной и неравномерной перфорацией .....	172
5.3.2	Результаты расчетов теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе ПГВ-1000М в номинальном режиме для ПДЛ с равномерной и неравномерной перфорацией .....	176
	РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5 .....	182
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	183
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:.....	185

## ОБОЗНАЧЕНИЯ

$a_i$	концентрация площади межфазной поверхности
$C_{12}$	коэффициент межфазного сопротивления
$C_{13}$	коэффициент сопротивления воды о внешнюю поверхность
$C_{23}$	коэффициент сопротивления пара о внешнюю поверхность
$C_D$	коэффициент сопротивления
$D_b$	диаметр пузырька
$d$	диаметр
$d_{отв}$	диаметр отверстий ПДЛ
$F_{id}$	сила межфазного сопротивления со стороны капель
$F_{if}$	сила межфазного сопротивления со стороны жидкой пленки
$\bar{f}$	степень перфорации ПДЛ
$G$	расход среды
$g$	ускорение свободного падения
$H$	уровень
$i$	удельная энтальпия
$k_s$	величина шероховатости
$k_{ПДЛ}$	коэффициент выравнивания ПДЛ
$l$	толщина ПДЛ
$M_{1s}$	объемный источник воды
$M_{2s}$	объемный источник пара
$P_0$	среднее давление в системе
$P_s$	коэффициент миграции легкой фазы в область с повышенной скоростью
$Pr$	число Прандтля
$q_3$	тепловой поток с внешней поверхности к среде
$q_i$	тепловой поток с межфазной поверхности к среде
$R_3$	коэффициент теплопередачи от внешней поверхности к среде
$R_{от}$	отрывной радиус пузырька
$R_i$	коэффициент теплопередачи от межфазной поверхности к среде
$Re$	число Рейнольдса
$S_{ГХ}$	площадь проходного сечения для перетекающего под ПДЛ

двухфазного потока

$S_{\text{отв}}$	суммарная площадь отверстий ПДЛ
$S_{\text{ПДЛ}}$	площадь ПДЛ
$t_s$	температура насыщения
$u$	скорость потока в направлении $x$
$u^*$	групповая скорость всплытия пузырей
$u_0$	скорость всплытия одиночного пузыря в неподвижной жидкости
$u_g$	скорость движения газовой фазы
$u_r$	относительная скорость между лидирующим пузырем и жидкой фазой
$V_{gj}$	скорость дрейфа
$v$	скорость потока в направлении $y$
$We$	число Вебера
$w$	скорость потока в направлении $z$
$\bar{w}'$	скорость истечения воды через отверстия ПДЛ
$\bar{w}''$	скорость истечения пузырей пара через отверстия ПДЛ
$w_{\text{от}}$	скорость пара в отверстиях ПДЛ
$W_0''$	скорость пара на зеркале испарения
$w_{\text{отв}}''$	приведенная скорость пара в отверстиях ПДЛ
$W_\varphi$	локальная приведенная скорость пара
$\alpha$	объемная доля
$\Gamma$	величина межфазной массопередачи
$\delta$	высота паровой подушки
$\delta_l$	высота действия гидростатического напора
$\xi$	коэффициент гидравлического сопротивления ПДЛ однофазному потоку
$\xi_b$	коэффициенты гидравлического сопротивления имитаторов продольных балок
$\varepsilon$	скорость диссипации турбулентной энергии в единице массы жидкой фазы
$\epsilon$	относительная шероховатость поверхности
$\lambda$	коэффициент сопротивления трения единицы относительной длины
$\rho$	плотность

$\varphi$		паросодержание
$\varphi_{\text{отв}}$		паросодержание в отверстиях ПДЛ
$\phi_j$		изменение межфазной поверхности вследствие j-го процесса взаимодействия
$\phi_{rh}$		изменение межфазной поверхности вследствие фазового перехода
$\eta_{rh}$		скорость генерации парового объема в единичном объеме пароводяной смеси
$\theta$		фактор взаимодействия пузырей
$\lambda$		константа эффективности сцепления; коэффициент теплопроводности
$\psi$		относительное живое сечение
$\Psi$		поправка на двухфазность
$\Delta P_{\Pi}$	ПДЛ	гидравлическое сопротивление при проходе пара через отверстия
$\Delta P$		гидравлическое сопротивление
$\Delta P_{\text{ГХ}}$		гидравлические потери на имитаторах продольных балок
$\Delta P_{\text{ПДЛ}}$		потери давления на ПДЛ

## Список сокращений

АЭС	атомная электрическая станция
ВВЭР	водо-водяной энергетический реактор
ВТИ	всероссийский тепло-технический институт
КИП	контрольно-измерительный прибор
ПГ	парогенератор
ПГВ	парогенератор вертикальный
ПДЛ	погруженный дырчатый лист
ППДЛ	пароприемный дырчатый лист
СВД	сосуд высокого давления
СО	среднеквадратичное отклонение
ЦКТИ	Центральный котлотурбинный институт
ЭНИЦ	Электрогорский научно-исследовательский центр
SAR	коэффициент стохастической аппроксимации



## ВВЕДЕНИЕ

### **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.

### **Цель и задачи диссертации:**

Целью диссертации 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.

### **Новизна работы**

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, 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 значимость**

Практическая значимость 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 выравнивающей 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 выравнивающей 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 переменности перфорации ПДЛ на выравнивание паровой нагрузки. Предложены рекомендации по степени перфорации ПДЛ вдоль его длины.

### **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».

### **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) и на семинарах

Отделения теплофизики Электрогорского научно-исследовательского центра по безопасности АЭС.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация содержит введение, 5 глав, результаты и выводы, список литературы из 122 использованных источников. Диссертация выполнена на 202 листах, включая 26 таблиц и 68 рисунков.

### **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, CD.
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, CD.
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» 2012-2015, 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» 2012-2015, 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.



# ГЛАВА 1 ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ ПОГРУЖЕННОГО ДЫРЧАТОГО ЛИСТА, НАПРАВЛЕННЫХ НА ДОСТИЖЕНИЕ ВЫРАВНИВАНИЯ ПАРОВОЙ НАГРУЗКИ

Интерес к гидродинамике двухфазного потока в окрестности погруженного дырчатого листа обусловлен ее существенным влиянием на сепарационные процессы в горизонтальном парогенераторе [1].

Сепарационные схемы с погруженными дырчатыми листами<sup>1</sup> (ПДЛ) впервые были предложены в 1945 году в работе [2] и получили широкое распространение в котлостроении. Дальнейшее применение они нашли в современных парогенераторах (ПГ) на АЭС с ВВЭР, отличающихся значительной неравномерностью эпюры скорости пара на зеркале испарения и более высокими паровыми нагрузками [3–7].

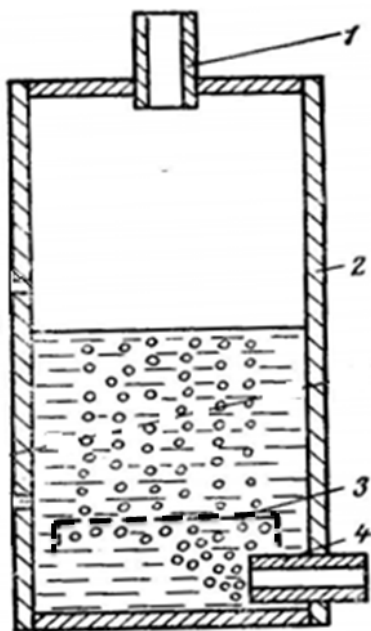
На АЭС с водо-водяными реакторами используются парогенераторы с горизонтальным расположением трубного пучка и одноходовой схемой движения теплоносителя, которая приводит к заметной неравномерности тепловыделения поверхности нагрева и к соответствующей неравномерности эпюры паровой напряженности зеркала испарения, поскольку трубные пучки не обладают заметным выравнивающим свойством. Максимальное значение коэффициента тепловой неравномерности, обусловленное экспоненциальным законом изменения температурного напора вдоль поверхности нагрева, равно 4 [8]. В связи с этим, для выравнивания эпюры паровой напряженности зеркала испарения, в парогенераторах ПГВ-1000/1200/1500 устанавливаются погруженные дырчатые щиты. Эффективность работы таких дырчатых щитов существенно зависит от их геометрических размеров и компоновки относительно циркуляционного контура.

Изложим основные закономерности движения пароводяной смеси в объеме с ПДЛ, следуя [3]. На Рис. 1.1 представлена принципиальная схема устройства с барботажем пара. Пар подводится под дырчатый лист, задача

---

<sup>1</sup> В литературе используется практически одинаково часто как термин «погруженный дырчатый лист», так и термин «погруженный дырчатый щит». Далее в диссертации используются оба термина.

которого – равномерное распределение пара по всему сечению барботера. Сопротивление водяного слоя приводит к определенному распределению паровой фазы по водяному объему. Однако дырчатый лист обеспечивает равномерное распределение пара практически независимо от высоты двухфазного слоя. Смысл этого устройства заключается в установке на пути движения паровых струй элемента с весьма большим гидравлическим сопротивлением по сравнению с сопротивлением свободного канала. Дырчатый лист не полностью перекрывает все сечение барботера, оставляя по периферии его свободные каналы для опускного движения воды. Влияние дырчатого листа на работу барботажного объема определяется гидродинамическими условиями, существующими как на выходной его плоскости, так и непосредственно под ним. Гидродинамика течения пароводяной смеси над дырчатым листом зависит от процессов формирования паровых пузырей на выходе из отверстий и отрыва их, определяемых в основном соотношением гравитационных сил и сил поверхностного натяжения. Главным количественным показателем здесь является скорость истечения пузырей пара через отверстия  $w_{от}$ .



1 – отвод пара; 2 – корпус; 3 – погруженный дырчатый лист; 4 – подвод пара

Рис. 1.1 – Схема барботажного устройства

Дырчатый лист может эффективно работать только при наличии под ним паровой подушки определенной толщины, образующейся из-за сопротивления листа. Для облегчения ее формирования дырчатый лист имеет кромки (закраины). Гидродинамическим фактором возникновения и существования устойчивой паровой подушки является определенный гидростатический напор, действующий на соответствующей высоте  $\delta_{л}$ .

Этот гидростатический напор уравнивается гидравлическим сопротивлением щита и поверхностным натяжением паровых пузырей, формирующихся в отверстиях ПДЛ.

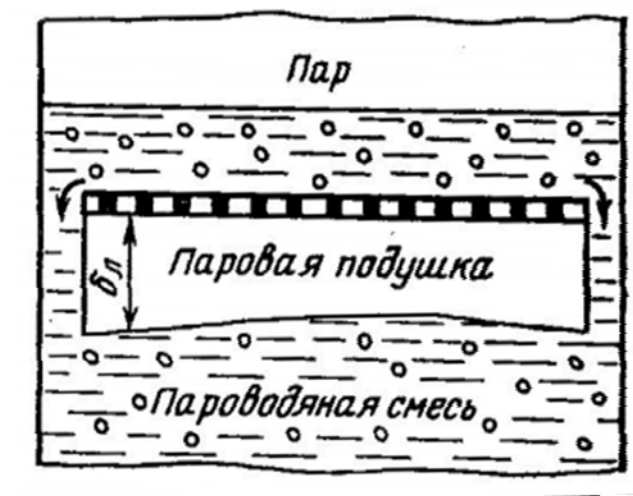


Рис. 1.2 – Погруженный дырчатый лист с паровой подушкой

Как видно из Рис. 1.2, барботажное устройство состоит из двух объемов: один занят двухфазной средой (происходит барботаж), а другой – однофазной средой – паром. Эти объемы отделяются друг от друга поверхностью, которую по установившейся терминологии называют зеркалом испарения.

Для расчета высоты паровой подушки  $\delta$  (см. Рис. 1.3) в [9, 10] используется следующее уравнение:

$$\delta(\bar{\rho}_3 - \rho'')g = \xi \frac{w_{от}^2}{2} \rho'' + \frac{2\sigma}{R_{от}} + \Delta P_1 + \Delta P_3 - H_1(\bar{\rho}_3 - \bar{\rho}_1)g - H_2(\bar{\rho}_3 - \bar{\rho}_2)g, \quad (1.1)$$

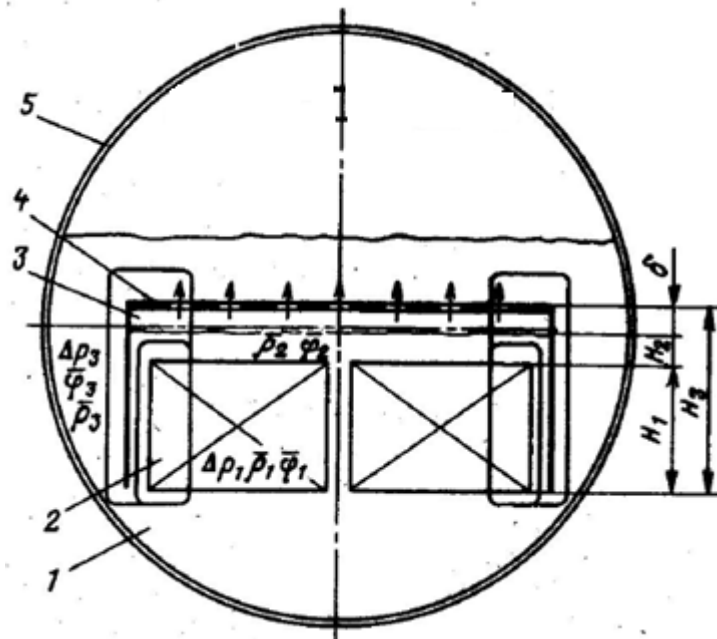
где  $\Delta P_1$  – гидравлическое сопротивление трубного пучка в пределах закраины листа,  $\Delta P_3$  – гидравлическое сопротивление опускного зазора,  $\bar{\rho}_1$  – средняя плотность двухфазного потока в трубном пучке,  $\bar{\rho}_2$  – средняя плотность двухфазного потока в слое между паровой подушкой и трубным пучком,  $\bar{\rho}_3$  – средняя плотность потока в опускном зазоре,  $w_{от}$  – скорость пара в отверстиях листа,  $R_{от}$  – отрывной радиус пузыря.

Анализ уравнения (1.1), выполненный в [10], показывает, что высота паровой подушки зависит как от гидравлических сопротивлений и гидродинамических параметров двухфазного потока в отдельных элементах контура, так и от высоты закраины ПДЛ. Наибольшую трудность, по мнению авторов [10], в расчетах такого дырчатого листа в виде «колпака», охватывающего трубных пучок (Рис. 1.3), представляет определение паросодержаний двухфазного потока в слое под паровой подушкой и в трубном пучке, а также гидравлического сопротивления  $\Delta P_1$ . Возникающие при этом трудности приводят к необходимости проведения экспериментальных исследований на натуральных моделях. Что касается паросодержания потока в опускном зазоре между закраиной и корпусом парогенератора, то, по-видимому, его значение можно принять равным нулю ввиду малости скоростей воды здесь и невозможности захвата пара [10]<sup>2</sup>. По этой же причине  $\Delta P_3 \approx 0$ . С точки зрения авторов [10] практически возможно рассчитать гидравлическое сопротивление отверстий ПДЛ с паровой подушкой по скорости пара без учета содержащейся в нем влаги, поскольку, как показывает опыт, истинное объемное паросодержание, измеренное с помощью гамма-лучей непосредственно под щитом, равно единице<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> На самом деле, как впоследствии показали стационарные измерения самого А.Г.Агеева с сотрудниками [27], а также эксперименты, проведенные в рамках работы над диссертацией, объемное паросодержание в опускном зазоре между закраиной и корпусом парогенератора больше нуля

<sup>3</sup> Последующие исследования различных авторов показали, что гидравлическое сопротивление отверстий ПДЛ может быть как больше, так и меньше чем гидравлическое сопротивление, создаваемое чистым паром



1 – опускной зазор; 2 – трубный пучок; 3 – паровая подушка; 4 – дырчатый лист с закраиной; 5 – корпус ПГ

Рис. 1.3 – Схема циркуляционного контура ПГ с погруженным дырчатым листом

Авторами [10] было проведено экспериментальное исследование гидродинамики ПДЛ с высотой закраины 200 мм при давлении 64 бар на барботажной колонке диаметром 242 мм (этот диаметр не оказывает влияния на среднее стабилизированное значение паросодержания двухфазного потока). Дырчатый лист имел отверстия диаметром 10 мм, его живое сечение составляло 11,8%. Для предотвращения попадания подаваемого пара в зазор между закраиной и обечайкой барботажной колонки (6 мм) на обечайке на расстоянии 50 мм от нижнего торца закраины был установлен отбойный экран конической формы.

В экспериментах определялось истинное объемное паросодержание в ряде характерных сечений, приведенная скорость пара варьировалась от 0,25 до 0,53 м/с, массовый уровень воды над листом менялся от 100 до 200 мм.

Результаты экспериментов [10] показали, что эпюры паросодержаний двухфазного потока в пределах закраины дырчатого листа при различных

паровых нагрузках меняются монотонно. При этом высота участка с монотонно изменяющимся паросодержанием сохраняется постоянной и приблизительно равной высоте закраины листа независимо ни от уровня воды, ни от паровой нагрузки. На участке двухфазного потока между нижней кромкой закраины и коническим экраном происходит локальная деформация эпюры паросодержаний, которая характеризуется сначала снижением, а затем, на расстоянии около 250 мм от горизонтальной пластины листа, увеличением паросодержания до стабильного значения. Локальная деформация эпюры паросодержания в этом районе происходит в результате поджатия и перестройки потока за экраном.

Непосредственно под горизонтальной пластиной щита паровая подушка высотой 50 мм зафиксирована только при приведенной скорости пара в колонке 0,53 м/с, а в отверстиях – 5,3 м/с. Такие же результаты дает и расчет по уравнению (1.1), в котором отсутствует пятый член в правой части (дырчатый лист с более короткими закраинами, не охватывающими трубный пучок). По этим расчетам при скорости пара в отверстиях щита 5,3 м/с образуется паровая подушка высотой 50 мм.

Принципиально важный результат полученный авторами [10] и согласующийся с данными [11, 12], состоит в том, что изменение массового уровня воды над щитом в широких пределах (от 150 мм и выше) приводит только к увеличению высоты стабилизированного участка двухфазного слоя, а протяженность переходной зоны практически не меняется. При массовом же уровне 100 мм высота переходной зоны сокращается, а эпюра паросодержаний смещается в область высоких значений.

Расширенное изложение исследований, упоминаемых в [10], а также информация о других исследованиях этих же авторов по этой тематике, приводится в научно-техническом отчете [8]. В [8] приводится подробная информация о рабочих участках, которые предназначались для изучения процесса гравитационной сепарации влаги в свободном объеме и

гидродинамической обстановки двухфазного потока над и под погруженным дырчатым щитом при различных циркуляционных схемах.

Основной задачей исследования [8] являлось экспериментальное исследование гравитационной сепарации влаги в свободном объеме при различных схемах циркуляционного контура. При этом одновременно изучалась гидродинамика двухфазного потока в подъемном и опускном участках контура, а также в районе погруженного дырчатого щита.

Для целей настоящей диссертации наибольший интерес представляют результаты исследований [8], полученные на рабочих участках №1, 2, 6, 7.

В рабочих участках №1 и №2 осуществлялось безнапорное движение пароводяной смеси. В барботажной колонке Ø242 мм на расстоянии 850 мм от потолочной пароприемной камеры был расположен погруженный дырчатый щит. В рабочем участке №1 этот щит полностью перекрывает поперечное сечение колонки. В рабочем участке №2 дырчатый щит выполнен с закраиной и образует по всему периметру колонки кольцевой зазор, ширина и высота которого равны соответственно 6 и 200 мм. Кольцевой зазор является опускным каналом по отношению к дырчатому щиту. Для предотвращения попадания пара в этот опускной канал из основного восходящего двухфазного потока на цилиндрической обечайке колонки несколько ниже дырчатого щита установлен конический экран. Угол наклона образующей экрана к вертикали равен 30°.

Основные геометрические размеры погруженных дырчатых щитов рабочих участков №1 и №2 (диаметр и форма отверстий, живое сечение перфорации, отношение площади поперечного сечения опускного канала и внутренней полости дырчатого щита) равны аналогичным размерам дырчатого щита парогенератора ПГВ 1000.

В рабочих участках №6 и №7 циркуляционный контур включает в себя элементы трубного пучка парогенератора. В этих рабочих участках установлен дырчатый щит с закраиной 200 мм, которая образует кольцевой зазор с обечайкой барботажной колонки. Ширина этого зазора равна 6 мм. Живое

сечение перфорации дырчатого щита составляет 6,4%. В рабочем участке №6 имеется внешний кольцевой ряд трубок (прутков), расположенных по периметру подъемной ветви контура высотой 336 мм

Коэффициент живого сечения этого ряда колец в вертикальной плоскости равен 0,57, что практически вдвое превышает аналогичный коэффициент в парогенераторе. В рабочем участке №7 имитируется трубный пучок высотой 336 мм. Имитатор трубного пучка выполнен из четырех кольцевых прутков, образующих коридорную компоновку пучка. Для исключения преимущественного расхода пароводяной смеси в центральной сводной части пучка в последней установлен вытеснитель.

Коэффициент живого сечения пучка в вертикальной и горизонтальной плоскостях равен соответственно 0,25 и 0,4, что совпадает с аналогичными коэффициентами трубного пучка парогенератора. Такая компоновка пучка содержит в себе принципиальную возможность поперечного (радиального) тока пароводяной смеси не только под погруженным щитом, но и в пределах трубного пучка.

В рабочих участках №6, №7 отношение площади поперечного сечения опускающего канала и подъемной ветви циркуляционного контура принято равным отношению соответствующих площадей подъемного участка в пределах трубного пучка и опускающего канала между трубным пучком и корпусом парогенератора.

Основная задача исследования [8], как отмечалось ранее, заключалась в экспериментальном исследовании гравитационной сепарации влаги в свободном объеме при различных схемах циркуляционного контура рабочих участков. При этом предполагалось, что в парогенераторе погруженный дырчатый щит, вследствие образования под ним паровой подушки, обеспечивает либо полное выравнивание эпюры паровой напряженности зеркала испарения ( $W_0'' = 0,33$  м/сек), либо этот щит таким свойством не обладает и в этом случае имеет место деформация эпюры паровой



напряженности зеркала испарения и локальное повышение приведенной скорости пара на зеркале испарения до 0,4 м/сек.

Исследования гравитационной сепарации в свободном объеме проведены на различных рабочих участках в зависимости от двух параметров – приведенной скорости пара над зеркалом испарения и положения весового уровня над погруженным дырчатым щитом. Для первых двух рабочих участков было получено, что при поддержании более высокого уровня воды имеет место повышенный унос влаги. Изменение же конструкции погруженного дырчатого щита практически не отразилось на сепарационных свойствах свободного парового объема.

Экспериментальные данные по влажности пара, полученные в рабочих участках №№ 6-7 при весовых уровнях воды ~ 100 и ~ 200 мм в зависимости от приведенной скорости пара показали, что изменение конструкции рабочих участков приводит к незначительному увеличению выноса влаги из барботажной колонки.

Для рабочего участка №1 при скоростях пара в его отверстиях ~ 4,2 м/сек под щитом образуется паровая подушка, поддержание при этом уровня воды над щитом в процессе проведения опытов представляло значительные трудности.

Наиболее важный результат исследования гидродинамики двухфазного потока в рабочем участке №2 (как отмечалось и при анализе статьи [10]) состоит в том, что при данной конструкции погруженного дырчатого щита (высота закраины 200 мм, живое сечение перфорации 11.8%) паровая подушка под ним образуется лишь при скорости пара в отверстиях около 5,3 м/сек (скорость пара на зеркале испарения 0,53 м/сек), которое существенно превышает соответствующие проектные значения скоростей в парогенераторе при номинальной его паровой нагрузке.

В рабочих участках №6 и №7 переходная зона с монотонно изменяющимся паросодержанием сохраняется в пределах закраины щита. Паросодержание двухфазного потока в непосредственной близости к трубному

пучку (на расстоянии 50 мм) при приведенной скорости пара в колонке и в свободном сечении трубного пучка соответственно 0,43 и 0,86 м/с не превышает 0,9 м/с, т.е. трубный пучок находится в потоке пароводяной смеси, а не пара.

Паровая подушка под погруженным дырчатым щитом в этих участках образуется при скорости пара в отверстиях около 6,5 м/с (приведенная скорость пара в колонке 0,36 м/с).

В заключении авторы [8] констатируют, что образование устойчивой паровой подушки под погруженным дырчатым щитом зависит от геометрических размеров (живое сечение перфорации, высота закраины) и от гидродинамической обстановки под щитом и в зазоре между закраиной и колонкой.

Также, авторами [8] были проведены исследования распределения истинного объемного воздухо содержания по высоте слоя воздуховодяной смеси, находящейся под дырчатым листом, при пониженном давлении (3 атм). Опыты проводились на сепарационной колонке диаметром 200 мм и общей высотой 2200 мм. Внутри нижней части колонки крепилась изготовленная из плексигласа цилиндрическая вставка внутренним диаметром 156 мм. Длина этой вставки, в зависимости от установленного участка, менялась от 700 до 950 мм. К верхнему торцу вставки крепились дырчатые листы различной геометрии. В первом участке вставка заканчивалась дырчатым листом с диаметром отверстий 10 мм и живым сечением 10%. Циркуляция жидкости осуществлялась через дырчатый лист. Весовой уровень над дырчатым листом был 100 мм и выше.

Во втором участке кольцевой зазор между плексигласовой вставкой и корпусом колонки на уровне дырчатого листа был перекрыт, а в плексигласовой вставке ниже дырчатого листа на 250 мм были прорезаны окна высотой 50 мм. Предполагалось, что через эти окна будет осуществляться циркуляция воды. Дырчатый лист имел те же размеры, что и в участке №1.

В третьем участке циркуляция воды осуществлялась как через дырчатый лист, так и окна плексигласовой вставки. Использовались дырчатые листы с диаметром отверстий 10 мм и 1 мм и  $\psi = 10 \%$ , дырчатый лист с одним центральным отверстием  $d = 52$  мм.

Опыты проводились при давлении 3 атм и различных скоростях воздуха. Так как скорость циркуляции определяется высотой плексигласовой вставки и сопротивлением циркуляционного контура, то при весовом уровне над дырчатым листом более 100 мм она практически оставалась постоянной при всех исследованных скоростях воздуха и равной 0,025 м/сек. Экспериментальные результаты и анализ так же представлены в отчете [8].

По итогам исследований, проведенных на двух стендах, авторы [8] делают следующие выводы.

1) В условиях равномерной нагрузки зеркала испарения при давлении 64 атм, весовом уровне воды над погруженным дырчатым щитом 100 мм и скорости пара 0,33 и 0,42 м/сек влажность пара на выходе из парогенератора будет около  $0,05 \div 0,1\%$ . Увеличение весового уровня воды выше 200 мм приводит к резкому росту влажности;

2) При давлении 64 атм определена сепарационная характеристика парового объема и зависимости от приведенной скорости пара и положения весового уровня воды. Влажность пара зависит от нагрузки парового объема в четвертой степени;

3) При пониженном уровне воды на дырчатом щите ( $h \leq 20$  мм) и при «сухом» дырчатом щите с действительным уровнем ниже щита на 100 мм капельный унос влаги увеличивается примерно в 10-20 раз по сравнению с затопленным щитом при весовом уровне около 100 мм;

4) Эпюры паросодержания двухфазного потока в переходной зоне над погруженным дырчатым щитом не зависят от его живого сечения и гидродинамической обстановки под щитом. Высота переходной зоны двухфазного потока над щитом при давлении 64 атм и весовых уровнях воды не

менее 150 мм может рассчитываться по известным зависимостям. При более низких уровнях воды переходная зона двухфазного потока над щитом вырождается в результате увеличения истинного объемного паросодержания в непосредственной близости от щита;

5) Эпюры паросодержания под погруженным дырчатым щитом зависят от паровой нагрузки, живого сечения перфорации щита и схемы циркуляционного контура. Высота участка эпюры с монотонно возрастающим паросодержанием под щитом при различных схемах циркуляционного контура в исследованном диапазоне паровых нагрузок при давлении 64 атм изменяется незначительно и равна 200÷250. При приведенной скорости пара в колонке и в свободном сечении трубного пучка соответственно 0,43 и 0,65 м/сек истинное объемное паросодержание на расстоянии 50 мм от трубного пучка не превышает 0,9;

6) Образование устойчивой паровой подушки под погруженным дырчатым щитом зависит от живого сечения перфорации, высоты закраин и гидродинамической обстановки под щитом и в зазоре между закраиной и колонкой. В исследованных рабочих участках с высотой закраины 200 мм, отличающихся друг от друга живым сечением перфорации, схемой циркуляционного контура, скорость пара в отверстиях щита с паровой подушкой 50 мм равна 5,4 и 7,5 м/сек. Увеличение высоты закраины дырчатого щита способствует усилению циркуляции воды по контуру и вырождению паровой подушки. Вместе с тем с ростом кратности циркуляции ухудшаются условия выравнивания расхода пара по сечению барботажа.

В статье [13] авторы ссылаются на ряд рекомендаций [10, 14, 15, 16] для выбора скорости пара, при которой обеспечивается наличие паровой подушки под ПДЛ. Однако, подчеркивают авторы [13], расчеты согласно рекомендациям дают существенно различные значения скоростей пара. В работе [13], со ссылкой на [7], отмечается одинаково эффективная выравнивающая способность ПДЛ на барботажной колонке диаметром 740 мм для ПДЛ с живым сечением 17,7% и 7,9%. Исследования авторов [13], выполненные на

водовоздушной модели барабан-сепаратора натурального диаметра, также не обнаружили влияния на сепарационные характеристики живого сечения листа при его изменении от 2,7% до 14,3% (в режимах без прорыва пара через сливной канал ПДЛ). Результаты визуальных наблюдений показали, что сплошной подушки под листом на всей его площади не образуется даже при относительно высокой скорости воздуха в отверстиях (до 22 м/с). Имеются лишь локальные области с газосодержанием, близким к единице. Вместе с тем положение видимого уровня при одинаковых скоростях воздуха, приведенных к сечению листа, практически не отличается для листов с различными живыми сечениями.

Указанные обстоятельства позволяют при выборе живого сечения ПДЛ ориентироваться на скорости пара в отверстиях листа, обеспечивающие удовлетворительные сепарационные характеристики, исходя из условия начала образования паровой подушки.

При определении скорости пара в отверстиях ПДЛ по заданной высоте паровой подушки более вероятным является наступление режима с прорывом пара через опускной канал ПДЛ. В работе [16] отмечено, что зависимости [14] для минимальной скорости пара в отверстиях применимы лишь к листам с малым размером отверстий (для давления 6,85 МПа диаметр отверстия менее 2 мм). При этом считается, что при диаметрах отверстий, характерных для реальных ПДЛ (10 – 13 мм), пар протекает через них сплошной струей. При выводе зависимостей [16] предполагается, что сопротивлением и наличием капель жидкости в паре можно пренебречь.

Необходимо отметить, что в момент, предшествующий образованию паровой подушки, поток пара, проходящий через ПДЛ, содержит значительное количество влаги. Так, по опытным данным, приведенным в работе [7], расход воды в этом режиме в 1,5 – 3 раза превышает расход пара. Это обстоятельство подтверждается данными, полученными авторами [13] на водовоздушной модели барабана-сепаратора.

Расчеты авторами [13] по рекомендованным и предложенным ими формулам выявили, что с увеличением живого сечения листа требуемая по условию образования паровой подушки скорость пара в отверстиях ПДЛ уменьшается. Это обстоятельство подтверждается и опытными данными.

Авторами [13] на стенде сепарации пара ВТИ были приведены экспериментальные исследования, направленные на изучение гидродинамики ПДЛ, определение сопротивления листа и условий прорыва пара через опускной канал ПДЛ. Исследования проводились на барботажной колонке диаметром 273x28 мм для ПДЛ с живым сечением 3,1 и 15,5% и высотой закраины 200 мм при давлении 3,5 и 6,85 МПа. Слабоперегретый пар (на 3–5 градусов по отношению к температуре насыщения) при заданном давлении подавался в раздающее устройство, которое обеспечивало подачу пара только в одну половину сечения колонки под ПДЛ. Над ПДЛ поддерживался постоянный уровень воды примерно 150–200 мм. Для определения перепадов давления на листе и под ним были установлены четыре отборника давления. Измерения перепадов давления производились при длительном поддержании стабильного режима и повторялись в различных сериях опытов. По результатам измерений определялись средние значения паросодержания на участках между отборами давления и сопротивление ПДЛ.

На Рис. 1.4 приведено изменение паросодержания под ПДЛ, полученное авторами [13]. Для низкой скорости пара (до 0,2 м/с) паросодержание на участке между отборами № 3–4 примерно соответствует рассчитанному. При этом паросодержание на участке 2–3 приближается к единице. Анализ эпюр распределения паросодержания под ПДЛ, приведенных в работе [7], показывает, что паровая подушка высотой 50 мм образуется при скорости пара в отверстиях ПДЛ на 20–30% большей, чем требуется для образования минимальной подушки. Таким образом, можно считать, что при скорости пара около 0,18 м/с (скорость в отверстиях примерно 6 м/с) уже имеется минимальная паровая подушка. Это подтверждается также характером

изменения сопротивления ПДЛ с живым сечением 3,1%, которое начинает отличаться от рассчитанного при скорости пара в отверстиях около 6 м/с.

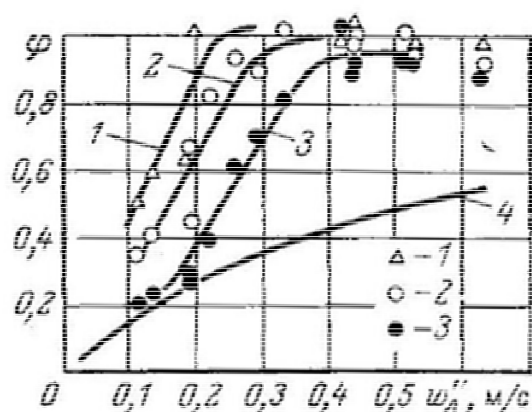


Рис. 1.4 – Зависимость паросодержания под ПДЛ от скорости пара под листом (живое сечение 3,1%, давление 3,5 МПа); 1 – на участке 2-3, 2 – на участке 2-4, 3 – на участке 3-4, 4 – расчет

Для уточнения рекомендаций [13] целесообразно проведение исследований выравнивающей способности ПДЛ, а также условий образования паровой подушки и прорыва пара через опускной канал ПДЛ в более широком диапазоне конструктивных и расходных параметров.

Подчеркивают важность расчета сопротивления ПДЛ с высокой точностью и авторы [17]. В случае чрезмерно большого сопротивления листа может произойти прорыв пара через сливной канал ПДЛ. При малом сопротивлении лист работает неравномерно; через часть отверстий вода сливается с ПДЛ.

Существующие работы (например, [14]), подчеркивают авторы [17], основаны на предположении о проходе через отверстия однофазной среды – сухого насыщенного пара. Это справедливо только при наличии под ПДЛ слоя пара значительной высоты. В реальных же условиях работы ПДЛ, через отверстия листа вместе с паром проходит существенное количество воды. Более того, область параметров, характерная для ПДЛ, остается мало исследованной, а расчетные рекомендации дают существенные расхождения.

Физическая картина движения двухфазного потока через дырчатый лист близка к картине движения его в диафрагме. Отличие, резюмируют авторы [17], имеется при течении потока за листом, где происходит слияние струй смеси, что может приводить к несколько иному характеру влияния диаметра отверстий и живого сечения по сравнению с диафрагмами.

При течении двухфазной смеси через диафрагму или дырчатый лист основные потери давления связаны с потерями на сужение потока и расширение его за отверстием. Другие потери (трение в отверстии, самоиспарение, расширение пара, ускорение задержанной диафрагмой жидкости, распыл части жидкости паром) для условий работы ПДЛ не существенны.

Вопрос о потерях давления при проходе пароводяной смеси через отверстия диафрагм подробно рассмотрен в [18]. Решающим для правильного расчета потерь на сужение и расширение потока является определение истинных объемных паросодержаний: в отверстии диафрагмы, в самом узком сечении струи и за диафрагмой. Для расчета этих паросодержаний авторами [18] предложены довольно сложные зависимости, которые решаются численными методами. Также в [18] подчеркивается, что гидравлические потери в местных сопротивлениях при течении двухфазной смеси исследованы недостаточно, несмотря на то, что они могут составлять существенную долю в суммарных потерях. При этом экспериментальные исследования, по мнению авторов [18], проведены в довольно узком диапазоне изменения видов местных сопротивлений и основных параметров двухфазного потока, содержат ошибки в методике постановки эксперимента [19], а результаты опытов разных авторов при исследовании подобных видов местных сопротивлений иногда противоположны [20, 21]. В связи с этим, авторы [18] провели ряд экспериментальных и теоретических исследований гидравлических потерь при течении двухфазного потока в местных сопротивлениях.

Для экспериментов использовались пароводяная и воздуховодяная смеси, параметры пароводяной смеси изменялись в диапазоне 10, 15, 20, 65 бар,



скорости циркуляции менялись от 0,5 до 3 м/с, паросодержание от 0 до 1. Установка представляла собой замкнутый циркуляционный контур. Опыты на воздуховодяной смеси проводились при давлении 5 бар. Более подробно геометрия и методы измерения основных параметров описаны в [18].

Основные выводы, сделанные авторами [18] по итогам экспериментального исследования гидравлических потерь в диафрагмах и решетке при течении пароводяной и воздуховодяной смеси следующие:

- коэффициент негомогенности зависит от давления, массового расходного паросодержания и относительной глубины отверстия диафрагмы;
- длина стабилизации пароводяной и воздуховодяной смеси за диафрагмами значительно больше длины стабилизации однофазной среды и при давлениях 10–20 бар (для воздуховодяной смеси 5 бар) хорошо описываются предложенными в статье зависимостями;
- возможно моделирование процессов, происходящих в местных сопротивлениях при течении пароводяной смеси, с помощью воздуховодяной смеси соответствующего давления.

Для реальных параметров работы ПДЛ решения, предложенные в [18], могут быть существенно упрощены прежде всего путем использования известных зависимостей для объемного паросодержания, предполагают авторы [17]. Так, паросодержание за листом для ПДЛ может быть определено по формуле для барботажа, а паросодержание в самом узком сечении струи непосредственно после прохода отверстия, согласно результатам исследований [22], может быть принято равным паросодержанию в отверстиях листа.

Формулы для определения сопротивления двухфазному потоку записываются в виде произведения сопротивления гомогенной смеси на поправку, учитывающую «негомогенность» потока. Применительно к ПДЛ поправку  $\Psi$ , по мнению авторов [17], целесообразно относить к сопротивлению  $\Delta P_{\text{п}}$  при проходе пара через отверстия листа, поскольку именно скорость пара в

отверстиях является заданной. Тогда сопротивление двухфазному потоку определяется в виде произведения  $\Delta P_{\Pi}$  на  $\Psi$ .

$$\Delta P = \Delta P_{\Pi} \cdot \Psi \quad (1.2)$$

Авторами [17] была предложена формула для определения коэффициента  $\Psi$ , полученная для условий, характерных для работы ПДЛ.

$$\Psi = \frac{1}{\varphi_{\text{отв}}} + \frac{(1-x)\rho''}{x\rho'} \frac{1}{(1-\varphi_{\text{отв}})}, \quad (1.3)$$

где  $\varphi_{\text{отв}}$  – паросодержание в отверстиях листа.

Для объемного паросодержания в отверстиях авторы [17] рекомендуют использовать соотношение, предложенное Крамеровым А.Я. и Шевелевым Я.В. в [23]:

$$\varphi_{\text{отв}} = \bar{w}'' / (\bar{w}'' + \bar{w}' + a), \quad (1.4)$$

где  $a = 0,65 \div 0,398P$  при  $P > 3$  МПа по данным [24]. При этом авторы [17] предлагают следующую зависимость для расчета скорости истечения воды через отверстия ПДЛ:

$$\bar{w}' = 0,43 - 0,023P \quad (1.5)$$

Для экспериментального подтверждения применимости формулы, были выполнены исследования сопротивления дырчатых листов на экспериментальном участке стенда сепарации пара ВТИ. Пароводяная смесь, поступающая в экспериментальный участок, подготавливалась в смесителе перегретого пара и питательной воды.

Экспериментальный участок представлял собой вертикально расположенный сосуд высотой 3 метра, изготовленный из трубы диаметром 108x8 мм с патрубками и фланцевым соединением в средней части. Нижнее и верхнее доньшки сосуда были оснащены перфорированными раздающими камерами. В средней части сосуда устанавливались сменные дырчатые листы.

Живое сечение листов варьировалось от 7,04 до 17,8 %, диаметр отверстий от 6 до 100 мм, относительная толщина листа  $\delta/d_{\text{отв}}$  составляла 0,5 и 0,33. Отборы статического давления по высоте сосуда располагались на отметках 910, 104 и 20 мм выше листа и на 22, 120, 220 и 990 мм ниже листа. Опыты начинались с определения сопротивления листа и перепадов давления на отдельных участках при проходе перегретого пара. Затем при том же расходе пара в смеситель подавалась питательная вода заданного расхода. Исследования проведены при давлениях 0,98; 1,96; 2,95; 4,90; 6,85 МПа. При каждом давлении пара выполнялись измерения при нескольких значениях скоростей воды и скоростей пара.

Коэффициент сопротивления дырчатых листов определялся по полному перепаду давления с учетом его восстановления. По результатам опытов на однофазной среде можно заключить, что коэффициент сопротивления слабо зависит от критерия  $Re$  в диапазоне его значений 25000 – 150000. Коэффициент сопротивления несколько увеличивается с уменьшением относительной толщины листа (от 0,5 до 0,33) и возрастает с уменьшением диаметра отверстий (с 10 до 6 мм). Указанные обстоятельства хорошо согласуются с данными [25].

Анализ влияния режимных параметров и конструктивных характеристик, отмечают авторы [17], наиболее удобно производить в виде зависимости  $\Psi$  от этих параметров. На Рис. 1.5 дана зависимость  $\Psi$  от скорости пара в отверстиях листа при давлении 6,85 МПа, а на Рис. 1.6 – зависимость  $\Psi$  от массового паросодержания, полученная при давлениях пара от 0,98 до 6,85. По приведенным данным можно заключить, что имеется влияние скорости воды в отверстиях листа на  $\Psi$  при одинаковых скоростях пара. С увеличением массового паросодержания более 0,5 значение  $\Psi$  приближается к единице, а уменьшение паросодержания менее 0,2 приводит к значительному возрастанию  $\Psi$ . С ростом давления при прочих равных условиях значение  $\Psi$  возрастает; при массовом паросодержании более 0,5 влияние давления невелико.

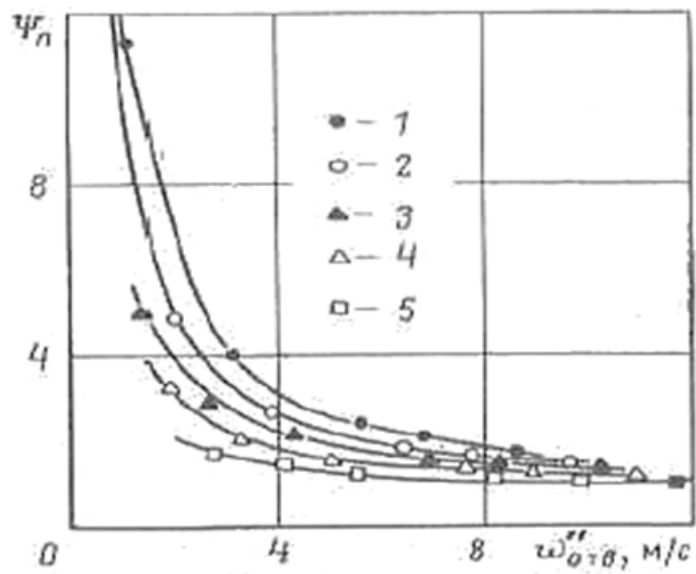


Рис. 1.5 – Зависимость  $\Psi$  от скорости пара в отверстиях при давлении 6,85 МПа и различной скорости воды (живое сечение листа 7,04%, диаметр отверстий 6 мм, относительная толщина 0,5)

1 – 0,55 м/с, 2 – 0,43 м/с, 3 – 0,35 м/с, 4 – 0,26 м/с, 5 – 0,16 м/с, 6 – расчетное по пару

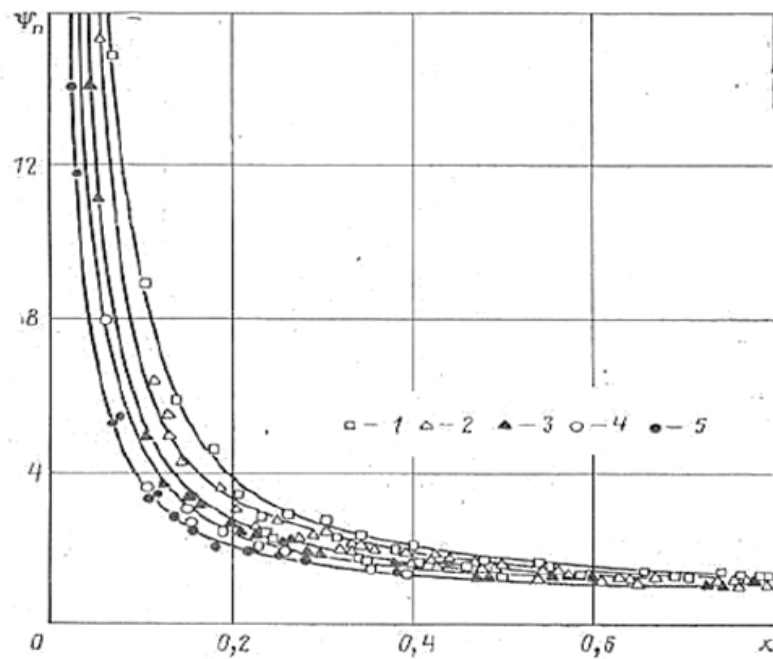


Рис. 1.6 – Зависимость  $\Psi$  от массового паросодержания при различных давлениях (живое сечение листа 17,8%, диаметр отверстий 10 мм, относительная толщина 0,3)

1 – 6,85 МПа, 2 – 4,90 МПа, 3 – 2,95 МПа, 4 – 1,96 МПа, 5 – 0,98 МПа

Анализ опытных данных, полученных на дырчатых листах с различными живыми сечениями, диаметром отверстий и относительной толщиной листа, показывает, что в исследованном диапазоне изменения указанных параметров они практически не влияют на  $\Psi$  при прочих равных условиях.

Авторами [26] анализировалась возможность увеличения паровых нагрузок при гравитационной сепарации с 0,3 до 0,7 м/с. Были выполнены экспериментальные исследования ПДЛ при натуральных параметрах ПГВ-1000. Исследования были выполнены при давлении 6,85 МПа в диапазоне изменения паровых нагрузок зеркала испарения 0,1 – 0,65 м/с при равномерном и неравномерном подводе пароводяной смеси. Модель (Рис. 1.7) имела две конструктивные модификации ПДЛ: с относительным живым сечением 6,2% и высотой закраины 200 мм, и с относительным живым сечением 13,9 % и высотой закраины 150 мм. Диаметр отверстий перфорации 10 мм. Отношение площади погруженных щитов к площади поперечного сечения сосуда высокого давления составляет 0,79, конструктивная высота парового объема равна 950 мм. Нижняя часть сосуда использовалась для организации контура естественной циркуляции воды в исследуемой модели. Пароводяная смесь из четырех патрубков поступала в смесительную камеру и далее, обтекая защитные пластины, в водяной объем, где разделялась на пар и воду. Вода с незначительным количеством захваченного пара поступала в опускную трубу контура циркуляции. Для обеспечения конденсации захваченного пара в опускной трубе установлен смеситель, в который подавались питательная вода с температурой 104 °С. Основной поток пара через отверстия ПДЛ и двухфазный слой над листом поступал в паровой объем модели и через ППДЛ в сбросной трубопровод. Вода, вынесенная на щит, сливалась по опускному зазору между закраиной щита и корпусом сосуда высокого давления.

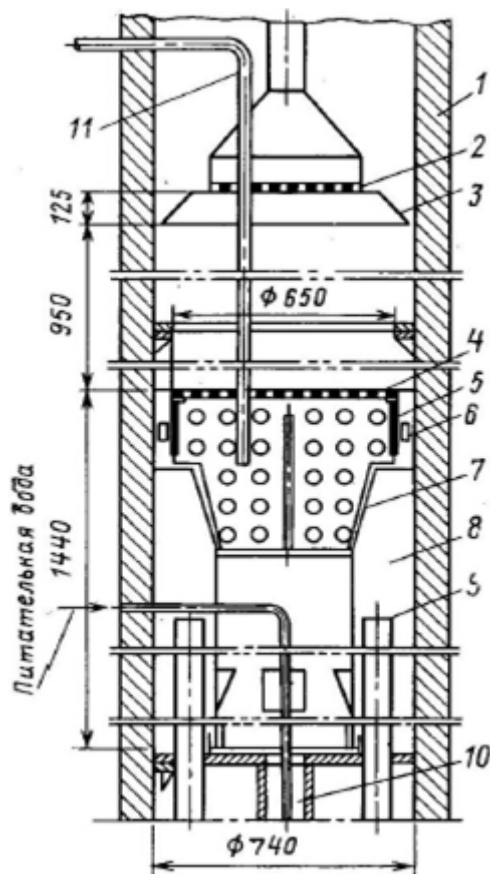


Рис. 1.7 – Модель парогенератора [26]

1 – корпус сосуда высокого давления; 2 – пароприемный потолочный щит; 3 – конический козырек; 4 – погруженный дырчатый щит; 5 – закраина; 6 – турбинные расходомеры; 7 – защитные пластины; 8 – смесительная камера; 9 – патрубки подвода пароводяной смеси; 10 – опускная труба; 11 – направляющая труба гамма-источника

В процессе исследований изучались условия образования под щитом паровой подушки и ее устойчивости, выравнивающая способность листов, циркуляция воды через лист. Влажность пара в сбросном трубопроводе и в трех точках парового объема определялась по отношению концентрации  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  в воде и паре. Паросодержание двухфазного потока под щитом и в двухфазном слое над щитом определялось методом гамма-просвечивания. Общая высота просвечиваемого участка составляла 850 мм.

Исследование показало, что паросодержание двухфазного потока под щитом возрастает с ростом паровой нагрузки и по мере приближения двухфазного потока к листу. При определенных условиях непрерывность двухфазного слоя под листом нарушается и образуется паровая подушка.

Паровая подушка высотой 50 мм для щита с живым сечением 6,2% зафиксирована при скорости пара на зеркале 0,28 м/с, для листа с живым сечением 13,9% – при скорости пара на зеркале испарения 0,35 м/с. Дальнейшее увеличение скорости пара для обоих щитов приводит к росту высоты паровой подушки. При этом вследствие квадратичной зависимости высоты паровой подушки от скорости пара увеличение ее высоты в пределах закраины происходит в довольно узком диапазоне изменения скорости пара, что при определенных условиях приводит к выбросам пара в опускной зазор.

Определено значение скорости пара, при котором начинается его выброс из-под закраины. Для щитов с живыми сечениями 6,2 и 13,9% эта скорость равна соответственно 0,32 и 0,4 м/с. Дальнейшее увеличение паровой нагрузки приводит к неустойчивости в опускном зазоре, что характеризуется периодическим сливом воды со щита и проскоком пара с высокой скоростью.

Исследования выравнивающей способности погруженных щитов с паровой подушкой проведены авторами [26] на модели со щитом с живым сечением 6,2%. Эффективность выравнивания паровой нагрузки оценивалась по влажности пара с помощью трех пробоотборников, установленных на отметке 638 мм. Эти исследования показали, что при неравномерности подвода пара на зеркале испарения 0,3 – 0,65 м/с паровой объем на указанной отметке нагружен практически равномерно.

Расходы циркулирующей воды через отверстия исследованных листов показаны на Рис. 1.8 в виде зависимости отношения расхода воды к расходу пара от паровой нагрузки зеркала испарения.

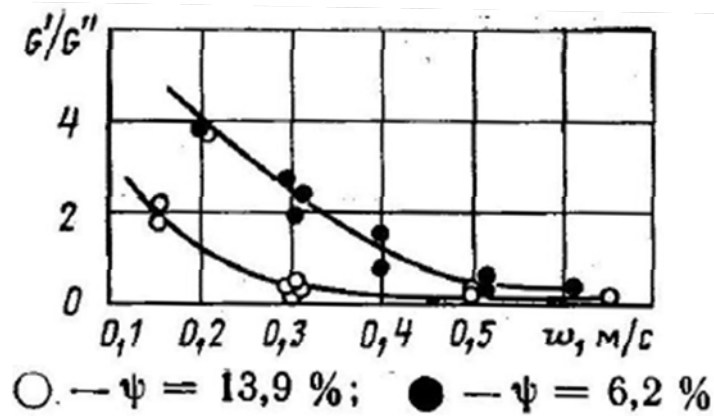


Рис. 1.8 – Зависимость относительного расхода воды, циркулирующей через ПДЛ, от приведенной скорости пара

Видно, что с ростом скорости пара относительный расход воды уменьшается. При этом характер изменения существенно зависит от паровой нагрузки. Для скорости пара 0,3 м/с расход воды в несколько раз превышает расход пара. При скорости пара более 0,3 м/с для щита с живым сечением 6,2% расход воды резко уменьшается. Аналогичный эффект наблюдается для щита с живым сечением 13,9%, но при более высокой скорости пара, равной 0,4 м/с. Такой характер зависимости обусловлен гидродинамикой двухфазного потока под щитом. При скорости пара менее 0,3 м/с под щитами сохраняется непрерывный двухфазный поток без паровой подушки, т.е. через отверстие в этом режиме происходит устойчивая циркуляция пароводяной смеси. Образование паровой подушки приводит к довольно резкому нарушению циркуляции и уменьшению выноса воды. В этом случае расход воды через отверстия определяется влагой, которая выбрасывается с физического уровня под щитом и зависит, следовательно, от высоты паровой подушки. В частности, для щита с живым сечением 13,9% увеличение паровой подушки от 50 до 150 мм сопровождается уменьшением относительного расхода воды в 2 раза.

Авторами [27] был осуществлен комплекс сепарационных, тепловых и гидродинамических испытаний, проведенных на пятом блоке ВВЭР-1000 НВАЭС. Особенностью конструктивного выполнения погруженного дырчатого щита в ПГВ-1000 является наличие протяженной закраины длиной 730 мм,



охватывающей трубный пучок с целью организации естественной циркуляции теплоносителя. В [27] изложены результаты испытаний, в ходе которых измерялись истинные объемные паросодержания, скорости и направления потока в характерных зонах ПГ, а также гидравлическое сопротивление погруженного щита. ПГВ-1000 был оснащен системой измерений, включающей датчики скорости и направления потока и датчики паросодержания.

Измерения гидродинамических параметров производились в стационарных режимах работы ПГ при различных уровнях его мощности и положения массового уровня воды относительно горизонтальной пластины погруженного листа.

Анализ опытных данных [27] показал, что с ростом мощности величины паросодержаний увеличиваются приблизительно по линейному закону. Образование паровой подушки, т.е. увеличение паросодержания под горизонтальной пластиной ПДЛ до единицы, происходит при мощности ПГ 75 – 80% от номинальной. До мощности ПГ 90% паросодержание практически не зависит от положения уровня, при мощности 95-100% от номинала повышение уровня до -100 мм приводит в большинстве зон парогенератора к скачкообразному снижению паросодержания. Вместе с тем паросодержание в зазорах между закраиной и корпусом ПГ, а также закраиной и пучком со стороны «горячего» коллектора с повышением массового уровня увеличивается.

В экспериментах было получено высокое значение паросодержания во внешнем зазоре между закраиной щита и корпусом парогенератора со стороны горячего коллектора, которое свидетельствует о попадании в этот зазор значительного количества пара. Это обусловлено, по-видимому, рядом факторов. Часть пара сносится потоком воды из опускного зазора между противоположной стороной закраины и теплообменным пучком. Не исключено, отмечают авторы [27], также попадание во внешний зазор пара, который генерируется нижней частью теплообменного пучка, не охваченной закраиной щита.

Предположение о прорыве пара из-под закраины ПДЛ вследствие его недостаточного живого сечения, равного 3,7%, не подтвердилось. Увеличение в части опытов живого сечения щита с 3,7 до 6,1 % не исключило выброса пароводяной смеси из внешнего зазора.

В работах [28, 29, 30] исследовалось влияние двухфазности потока на потери давления в течениях через местные сопротивления.

В работе [28] в ходе экспериментального исследования было получено, что необратимые потери на местном сопротивлении в исследованном диапазоне конструкций, паросодержаний и режимных параметров пропорциональны полному перепаду давлений. Этот факт на однофазном потоке был установлен и другими авторами [29]. Также, в [28] была получена зависимость, пригодная для расчета истинного объемного паросодержания в каналах малого диаметра.

В результате проведения работы [28] была получена зависимость для расчета потерь давления при движении двухфазного потока через дистанционирующие решетки канала РБМК. При этом коэффициент сопротивления предлагается рассчитывать на основании полученных в работе зависимостей.

В работе [30] исследовались потери давления двухфазного течения при изменяющейся геометрии канала (сужение и расширение). При проведении эксперимента были использованы два рабочих участка, в которых устанавливались исследуемые устройства, обеспечивающие необходимое сужение и расширение двухфазного потока.

Динамика двухфазного потока анализировалась с помощью кино съемки. На расстоянии 30 гидравлических диаметров от входа в канал была установлена вставка, сужающая проходное сечение потока. Из кадров кино съемки видно, что двухфазный поток начинает сжиматься еще не доходя до самой вставки, причем в углах по обе стороны двухфазного потока находится жидкость, совершающая слабое вихревое движение. Жидкость течет в виде пленки вдоль

стенки суженного канала. Непосредственно за вставкой образуется струя, на границах которой наблюдается интенсивное перемешивание. Двухфазная смесь при течении внутри вставки и за ней вполне однородна.

В результате наблюдений режимов течения и в результате анализа перепада и потерь давления в каналах с изменяющимся сечением, в [30] были получены следующие результаты:

- 1) самое узкое сечение струя имеет непосредственно за входом в сужение;
- 2) в случае сжатия потока наблюдается интенсивное перемешивание, и вблизи самого узкого сечения двухфазная смесь оказывается достаточно однородной;
- 3) в окрестности самого узкого сечения скольжение уменьшается, а просодержание увеличивается.

Исследованиям гидродинамики ПГВ-1000 посвящена статья [32]. Авторы подчеркивают важность наличия информации о работе опускных каналов между пакетами труб, о гидродинамической обстановке над трубным пучком (эффективно ли происходит перемешивание питательной воды с циркулирующей водой ПГ). Для этого ими были проведены испытания ПГВ-1000 без ПДЛ, что могло позволить оценить эффективность работы опускных каналов трубного пучка по изменению разницы показаний уровнемеров, установленных возле горячего коллектора и на днище ПГ, а также дать ценную информацию о некоторых особенностях работы элементов штатной схемы ПГВ-1000, которые не удалось достаточно четко определить при проведении его первых испытаний [33].

Исследования были проведены на одном из ПГ в период пусконаладочных работ. Все перфорированные пластины ПДЛ были сняты, сообщение водяного объема над трубным пучком с пространством опускных каналов между корпусом и закраиной ПДЛ было обеспечено открытием имеющихся там окон (10 шт, 850x130 мм).

Анализ исследований подробно описан в [33], отметим некоторые из выводов авторов статьи:

- в тесном шахматном трубном пучке ПГВ-1000 при высоких удельных нагрузках наблюдается выход пара в опускные каналы между трубными пакетами. Это происходит в основном в верхней части пучка;
- в диапазоне нагрузки ПГ до 75-80% от номинальной в зоне максимальной паровой нагрузки наблюдается эффективное проникновение воды из объема над трубным пучком в пространство между верхними рядами труб;
- в ПГВ-1000 с ПДЛ недогретая до температуры насыщения питательная вода в зону горячего коллектора попадать не может;
- для обеспечения эффективной работы опускных каналов целесообразно выполнять выгородку верхней части пакетов трубного пучка не менее чем на  $2/3$  их высоты.

В [34] отмечается, что оптимизация конструкции ПДЛ является весьма актуальной задачей с точки зрения обеспечения приемлемой гидродинамики двухфазного потока в паровом объеме ПГВ-1000. Один из наиболее доступных путей – исследование крупномасштабных пароводяных моделей парогенератора.

Авторы [34] используют для анализа исследования ОКБ «Гидропресс» совместно с ВНИИАМом, заключающиеся в поиске закономерностей парораспределения, общих для моделей с различными конструкциями ПДЛ.

Модели представляли собой вырезку прямоугольного сечения  $0,35 \times 2,0$  м из верхней части корпуса натурального ПГ. Вследствие ограниченных габаритов прочного корпуса, высота закраины ПДЛ составляла  $0,5$  м (на  $0,25$  м короче, чем в ПГВ-1000). Под ПДЛ размещали имитатор только верхней части трубного пучка натурального ПГ. Режимы испытаний задавали расходом пара из коллектора под имитатор трубного пучка и массовым уровнем воды над ПДЛ. Повышение паровой нагрузки зеркала испарения достигало  $50\%$  от

номинальной и более, а уровень воды над ПДЛ повышался до тех пор, пока влажность пара на выходе из модели не достигала нескольких процентов. Парораспределение в объеме моделей контролировалось кондуктометрическим методом.

В [34] приведены результаты измерения локальных значений паросодержания, полученные на семи моделях. На моделях №1–4 исследовали влияние степени перфорации на выравнивающую способность, на моделях №5–7 проводили оценку выравнивающей способности ПДЛ со специальными насадками для раздачи пара. Степень перфорации менялась от 4 до 12,5 % в зависимости от модели (диаметр отверстий 13 мм), сосредоточенная неравномерность создавалась путем установки над имитатором трубного пучка глухого листа (модели 2–4). В модели 5 элементы ПДЛ для прохода пара были выполнены в виде коротких насадок, в цилиндрической части которых через шесть отверстий по 10 мм диаметром паровая фаза распространялась вдоль поверхности ПДЛ. Степень перфорации составляла 3,6%.

В модели 6 вход пара в насадки под ПДЛ осуществлялся через два паза, которые располагались на 80 мм ниже ПДЛ. Это должно было обеспечить устойчивость «паровой подушки». В этой конструкции было сделано дополнительно четыре отверстия по 4 мм диаметром, степень перфорации составляла 4,2%, а для выхода пара над ПДЛ – 4%.

В модели 7 устанавливались безбарботажные инерционные насадки, отводящие пар из «паровой подушки» под ПДЛ непосредственно в паровой объем, благодаря этому физический уровень воды под ПДЛ совпадал с массовым и практически не зависел от паровой нагрузки зеркала испарения.

Подробный анализ парораспределения по моделям описан в [34]. Отметим, что при анализе моделей 2–4 авторы [34] отмечают, что увеличение кратности циркуляции котловой воды через отверстия ПДЛ и увеличение паросодержания в опускной щели вследствие захвата пара опускным движением воды может вызвать в парогенераторе местную неустойчивость

циркуляции котловой воды вследствие уменьшения движущего напора циркуляции. В условиях модели наиболее приемлемым может быть значение степени перфорации 7,3 %, которое не приводит к аномальному увеличению местной скорости пара в зоне подъемного движения пароводяной смеси над ПДЛ модели и повышенному захвату паровой фазы опускным движением воды в щели. Для реального ПГВ выбранная степень перфорации должна быть пересчитана с учетом уменьшенной высоты закраины в моделях.

В [35] отмечается, что первоначальная перфорация ПДЛ в ПГВ-1000 составляла 3,7%. В дальнейшем для обеспечения гарантированного омывания верхних рядов трубок пароводяной смесью, а также получения влажности пара на выходе из парогенератора не более 0,2 % при паропроизводительности ПГВ-1000 свыше проектного значения 1469 т/ч, перфорация ПДЛ в ПГВ-1000 была увеличена до 7-8%.

Для уточнения выравнивающей способности ПДЛ с такой перфорацией на одном из парогенераторов ВВЭР-1000 в [35] были выполнены измерения перепадов давления на ПДЛ на сторонах входного и выходного коллекторов в одном поперечном сечении, среднего по высоте объемного паросодержания в пространстве между трубным пучком и ПДЛ на стороне входного коллектора, локального паросодержания по высоте парового пространства над и под ПДЛ на сторонах входного и выходного коллекторов.

Авторы [35] отмечают неожиданный результат при определении локального паросодержания под ПДЛ – паросодержание на стороне входного коллектора оказалось меньше паросодержания на стороне выходного коллектора. Возможно, что этот результат является следствием сноса пара с «горячей» стороны ПГ на «холодную» поперечным током воды под ПДЛ, отмечается в [35]. Полученный парадоксальный результат лишний раз свидетельствует о сложности гидродинамической обстановки под ПДЛ в зоне раздачи питательной воды и существенно различной структуре двухфазного потока под ПДЛ как в продольном, так и поперечном сечениях ПГ.

Приближенная методика расчета переменной перфорации погруженного дырчатого листа горизонтального парогенератора для обеспечения выравнивания нагрузки зеркала испарения предложена в [47].

В работе [47] отмечается значительная неравномерность эпюры тепловыделений по длине и ширине горизонтального парогенератора ПГВ-1000, из-за чего скорость генерируемого пара, с учетом конденсации части пара за счет подачи питательной воды, изменяется от 0,76 м/с в районе «горячего» коллектора до 0,12 м/с в районе «холодного» коллектора.

Исследования натуральных парогенераторов ПГВ-1000 показали, что при указанной выше исходной неравномерности под ПДЛ, коэффициент остаточной неравномерности паровой нагрузки зеркала испарения составляет 1,25, и при средней расчетной скорости пара на зеркале испарения  $W_0'' = 0,33$  м/с локальное значение скорости пара в наиболее теплонапряженной зоне в районе «горячего» коллектора составляет 0,41 м/с. Это значение скорости пара является определяющим при расчете сепарационной схемы ПГ.

В парогенераторе ПГВ-1500 скорость пара по длине теплообменного пучка изменяется от 1,2 м/с в районе «горячего» коллектора до 0,07 м/с в районе «холодного» коллектора. Повысить эффективность выравнивания паровой нагрузки ПГВ-1500 при исходной более высокой начальной неравномерности по сравнению с ПГВ-1000 можно с помощью переменной перфорации отдельных зон ПДЛ за счет перетока пароводяной смеси под ПДЛ из более нагруженных зон к менее нагруженным. В [47] представлен расчет переменной перфорации ПДЛ ПГВ-1500, которая должна обеспечивать выравнивание паровой нагрузки.

Для обеспечения выравнивания нагрузки зеркала испарения авторами [47] предложена приближенная методика расчета переменной перфорации ПДЛ горизонтального парогенератора, основные положения которой представлены ниже.

Расчет переменной перфорации ПДЛ предлагается проводить следующим образом:

- условно разделить всю площадь ПДЛ на определенное количество расчетных зон с выделением зоны с наибольшими нагрузками зеркала испарения;

- определить для зоны с наибольшими нагрузками зеркала испарения следующие параметры: общую площадь пластин ПДЛ, объемный расход пара, генерируемый в зоне, среднюю скорость пара, объемный расход пара при заданной номинальной скорости пара на зеркале испарения, излишек пара, который необходимо отвести из зоны за счет перетока пароводяной смеси под ПДЛ. Далее определяется коэффициент гидравлического сопротивления согласно [36, 37] для случая решеток с большой неравномерностью поля скоростей с одной стороны решетки и равномерного поля скоростей с другой ее стороны;

- в соответствии с [17, 25] рассчитать степень перфорации пластин ПДЛ, соответствующую полученному коэффициенту гидравлического сопротивления пластин ПДЛ;

- определить площадь отверстий в листах ПДЛ;

- определить скорость пара в отверстиях по объемному расходу пара при номинальной скорости пара на зеркале испарения;

- определить гидравлические сопротивления отверстий в листах ПДЛ.

Описанные выше действия предлагается повторить для каждой из последующих расчетных зон, в которые должна перетечь пароводяная смесь из зоны с наибольшими нагрузками зеркала испарения. Затем следует определение объемного расхода пара, который может перетечь из зоны с наибольшими нагрузками в каждую из остальных расчетных зон и который равен разности между объемным расходом пара, генерируемым в зоне, и объемным расходом пара при заданной номинальной скорости пара на зеркале испарения.



Таким образом, в каждой из последующих расчетных зон определяется коэффициент гидравлического сопротивления решетки, определяется перепад статического давления в каждой расчетной зоне на перфорированных пластинах ПДЛ при заданной номинальной скорости пара на зеркале испарения. Затем рассчитывается гидравлическое сопротивление отверстий в листах ПДЛ с учетом выноса с паром воды через отверстия.

После определения перепада статического давления под ПДЛ между зоной с наибольшими нагрузками зеркала испарения и остальными расчетными зонами, который необходимо создать для обеспечения перетока излишка пара, а также гидравлического сопротивления участков под ПДЛ, по которым происходит отвод излишков пара в соседние расчетные зоны, эти величины сравниваются. При разнице величин менее 25% расчет считается окончанным, при большей – повторяется при новых значениях степени перфорации пластин ПДЛ в каждой расчетной зоне.

По описанной выше методике авторами [47] был выполнен расчет переменной перфорации ПДЛ ПГВ-1500.

Вся площадь ПДЛ была разделена на четыре расчетные зоны, которые рассчитываются по методике, описанной выше. В результате расчета были получены значения перфорации для каждой зоны, а также число отверстий пластин ПДЛ и шаг между отверстиями при квадратной ячейке для каждого типоразмера пластин ПДЛ.

Таким образом, методика расчета переменной перфорации ПДЛ горизонтального парогенератора, основные положения которой приведены выше, позволяет достаточно быстро получить необходимые данные по величинам перфорации ПДЛ, обеспечивающим выравнивание нагрузки зеркала испарения. Следует отметить, что данная методика расчета переменной перфорации, как отмечают сами авторы [47], является приближенной. Действительно, для определения гидравлических сопротивлений под ПДЛ для перетоков пароводяной смеси используется значение объемного

паросодержания  $\varphi = 0,75$  и применяется гомогенная модель для описания сопротивления двухфазному потоку со стороны внутренних конструкций (опорных балок). В действительности распределение объемного паросодержания под ПДЛ – неоднородно (вблизи ПДЛ оно близко к 1, а на выходе из трубчатки оно может быть значительно ниже). Также, для определения коэффициента гидравлического сопротивления используется соотношение из [38], полученное для течения газа в длинной трубе с диафрагмой. В случае горизонтальных перетоков в пространстве между трубчаткой и ПДЛ геометрическая ситуация существенно сложнее: 1) поверхность ПДЛ и верхняя кромка трубчатки являются несплошными (проницаемыми), в отличие от стенок трубы; 2) расстояния между опорными балками, которые создают местные сопротивления, не слишком велики, чтобы рассматривать балки как независимые при определении гидравлического сопротивления, как это делается в [47]; 3) не учтены гидравлические потери на разворот части пароводяного потока в горизонтальном направлении.

Поэтому необходима экспериментальная проверка результатов расчета по ней в условиях стендовых испытаний, на которую обращают внимание и сами авторы [47]. В частности, в [47] говорится о необходимости экспериментальных исследований при номинальных параметрах второго контура на модели парогенератора, представляющей собой вырезку верхней части корпуса ПГ и состоящей из погруженного дырчатого листа с переменной перфорацией, имитатора теплообменного пучка и системы создания неравномерности паровой нагрузки.

Такой стенд несколько лет назад был создан в ОАО «ЭНИЦ». На нем были проведены соответствующие исследования. В выполнении этих исследований и анализе опытных данных принимал участие диссертант, полученные результаты изложены в Главе 2 диссертации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1:

1. Выполнен обзор исследований двухфазной гидродинамики, связанной с функционированием погруженного дырчатого листа в составе парогенератора.

2. Анализ обзора этих исследований показывает, что применение ПДЛ позволяет существенно снизить остаточную неравномерность паровой нагрузки на зеркале испарения.

3. Одним из способов дальнейшего снижения остаточной неравномерности паровой нагрузки на зеркале испарения, необходимого для повышения мощности парогенератора, является применение ПДЛ неравномерной перфорации.

4. Необходимы дальнейшие экспериментально-расчетные исследования с целью определения закономерностей выравнивания паровой нагрузки ПДЛ неравномерной перфорации и их применения для расчетов таких ПДЛ.

## ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫРАВНИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПДЛ НА СТЕНДЕ ПГВ

### 2.1 Краткое описание экспериментального стенда ПГВ

Подробное описание стенда ПГВ представлено в [45]. В данном разделе будут описаны его основные черты.

Основными элементами стенда являются:

- сосуд высокого давления (СВД);
- рабочий участок (поперечная "вырезка" натурального парогенератора ПГВ-1000 с моделями внутрикорпусных устройств);
- система подготовки пара, подаваемого в модель, включающая в себя линию подачи перегретого пара, линию подачи питательной воды в смеситель, из которого слабоперегретый пар по двум независимым линиям подается в СВД. Указанные линии оснащены приборами КИП для определения параметров пара и его расхода;
- линия подачи питательной воды в СВД;
- линия сброса пара из СВД, снабженная приборами КИП для определения параметров и расхода пара;
- система отбора проб пара с теплообменником и расходомерным устройством;
- система отбора проб воды с теплообменником и расходомерным устройством.

Основные технические характеристики стенда: давление пара в СВД – 7,0 МПа; номинальный расход пара – 10 т/ч.

Экспериментальная модель представляет собой поперечную "вырезку" натурального парогенератора ПГВ-1000, размещенную вдоль горизонтальной оси сосуда высокого давления диаметром 1670 мм (Рис. 2.1).

Длина нижней части модели 2450 мм, ширина модели 100 мм. Вертикальные размеры модели приняты равными натурным.

Сепарационная схема модели включает в себя основные элементы сепарационной схемы натурального парогенератора (ПГ): погруженный дырчатый лист (ПДЛ) расположен в нижней части модели, пароприемный дырчатый щит (ППДЩ) расположен в верхней части модели. ПДЛ перфорирован отверстиями  $\varnothing 13$  мм с острой кромкой, ППДЩ перфорирован отверстиями  $\varnothing 10$  мм. ПДЛ состоит из двух пластин, в пределах которых перфорация пластин равномерная, а ее относительное живое сечение на "горячей" стороне и "холодной" стороне в опытах варьируется. Перфорация ППДЩ равномерная, ее относительное живое сечение  $\psi = 4,5 \%$ . 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.

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. Внутренний объем коллектора разделен на две полости равного объема, в

каждую из которых пар подается по своей линии для обеспечения неравномерности подачи пара на "горячую" и "холодную" стороны модели (имитация разной паропроизводительности на "горячей" и "холодной" сторонах ПГ).

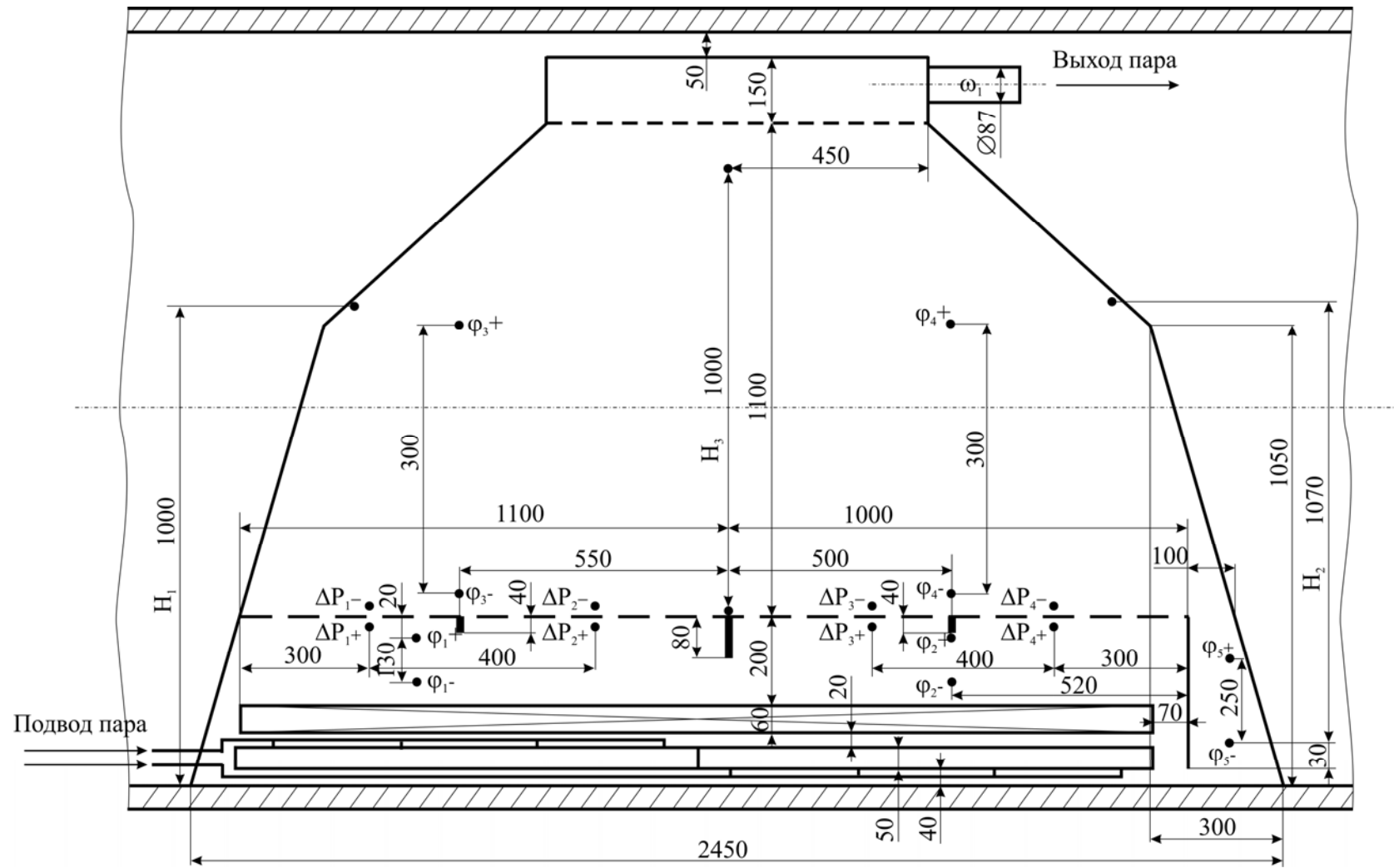


Рис. 2.1 – Модель (поперечная вырезка) парогенератора ПГВ-1000

Под ПДЛ расположены имитаторы опорных элементов ПДЛ натурального ПГ. В центре ПДЛ установлен имитатор балки продольной оси ПГ высотой 80 мм, снабженной отверстием для дополнительного перетока под ПДЛ. В центральных частях "горячей" и "холодной" стороны под ПДЛ установлены имитаторы продольных балок, выполненных в виде сплошных пластин высотой 40 мм.

В верхней части модели расположен коллектор отвода пара, образованный ППДЩ и коробом, установленным над ним с целью уменьшения коллекторного эффекта. На боковой стенке коллектора располагается патрубок отвода из модели отсепарированного пара с размещенным в нем пробоотборником измерения влажности пара.

Слив воды с ПДЛ осуществляется в "холодном" торце через зазор между корпусом модели и закраиной, ширина которого составляет 100 мм. 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. Относительное живое сечение перфорации пластин ПДЛ модели приведено в Табл. 2.1.

Табл. 2.1 – Относительное живое сечение перфорации листов ПДЛ в модели

Вариант ПДЛ	"Горячая" сторона	"Холодная" сторона
1	5,7 %	5,7 %
2	4,1 %	8,3 %

Экспериментальная установка работает следующим образом. При заданном значении уровня в модели подводимый пар охлаждается в смесителе и с небольшим перегревом ( $t_s + 5 \div 10$  °С) подается в парораздающий коллектор, расположенный в нижней части модели. Подача пара с разным расходом в две независимые полости парораздающего коллектора обеспечивает имитацию неравномерности паровой нагрузки под ПДЛ натурального парогенератора. 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. Определение перепадов статического давления под ПДЛ  $\Delta P_5, \Delta P_6, \Delta P_7$ , производится при подключении к нижним отборам давления дифманометров "Fuji" расположенных под ПДЛ, измерений  $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3, \Delta P_4$ .

Измерение массового уровня в модели производится гидростатическим методом. Массовый уровень  $H_2$  в модели измеряется в зазоре между корпусом и закраиной. Нижний отбор располагается на расстоянии 320 мм от горизонтальной пластины ПДЛ. Верхний отбор располагается в паровом объеме, расстояние между отборами 1070 мм.

При измерении уровня от отметки ПДЛ ( $H_3$ ) нижний отбор располагается в центре модели, верхний отбор в паровом объеме модели, расстояние между отборами 1000 мм.

Величины объемного паросодержания под ПДЛ  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  измеряются на расстоянии 20 мм и 40 мм от ПДЛ соответственно, расстояние между отборами 130 мм. 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. Отборы для определения величины объемного паросодержания в "холодном" торце между корпусом модели и закраиной располагаются на 70 и 320 мм ниже отметки ПДЛ.

Давление и температура в сосуде высокого давления измеряется в паропроводе выхода пара из сосуда высокого давления.

В Табл. 2.2 приводятся измеряемые величины и способы измерения. В Табл. 2.3 приведены погрешности измерений.

Табл. 2.2 – Измеряемые величины и способы измерения

	Измеряемый параметр	Средство измерения	Обозначение на схеме	Датчик, диапазон измерения
1.	Уровень в сосуде высокого давления	Гидростатические отборы	$H_1$	"Fuji", 0÷10 кПа
2.	Уровень в модели (нижний отбор ниже ПДЛ)	Гидростатические отборы	$H_2$	"Fuji", 0÷10 кПа
3.	Уровень над ПДЛ	Гидростатические отборы	$H_3$	"Fuji", 0÷10 кПа
4.	Гидравлическое сопротивление ПДЛ	Отборы давления	$\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3, \Delta P_4$	"Fuji", 0÷2,5 кПа
5.	Истинное объемное паросодержание под ПДЛ	Гидростатические отборы	$\varphi_1, \varphi_2$	"Fuji", 0÷2 кПа
6.	Истинное объемное паросодержание над ПДЛ	Гидростатические отборы	$\varphi_3, \varphi_4$	"Fuji", 0÷2,5 кПа
7.	Перепад статического давления под ПДЛ	Гидростатические отборы	$\Delta P_5, \Delta P_6, \Delta P_7$	"Fuji", -1 ÷ +1 кПа
8.	Истинное объемное паросодержание между корпусом модели и закраиной	Гидростатические отборы	$\varphi_5$	"Fuji", 0÷2,5 кПа

Табл. 2.3 – Погрешности измерений

Измерение	Верхний предел датчика, кПа	Верхняя граница диапазона измерения, кПа	Приведенная погрешность датчика, %	Абсолютная погрешность датчика, кПа
RA01DP01	32	3	$\pm 0,35$	$\pm 0,011$
RA01DP02	32	3	$\pm 0,35$	$\pm 0,011$
RA01DP03	32	3	$\pm 0,35$	$\pm 0,011$
RA01DP04	32	3	$\pm 0,35$	$\pm 0,011$
RA01DP05	32	2	$\pm 0,45$	$\pm 0,009$
RA01DP06	32	2	$\pm 0,45$	$\pm 0,009$
RA01DP07	32	2	$\pm 0,45$	$\pm 0,009$
RA01V01	32	2,5	$\pm 0,26$	$\pm 0,007$
RA01V02	32	2,5	$\pm 0,26$	$\pm 0,007$
RA01V03	32	2,5	$\pm 0,26$	$\pm 0,007$
RA01V04	32	2,5	$\pm 0,26$	$\pm 0,007$
RA01V05	32	2,5	$\pm 0,26$	$\pm 0,007$
RA01L01	32	10	$\pm 0,26$	$\pm 0,026$
RA01L02	32	10	$\pm 0,26$	$\pm 0,026$
RA01L03	32	10	$\pm 0,26$	$\pm 0,026$

## 2.2 Экспериментальное определение гидравлического сопротивления ПДЛ

### 2.2.1 Описание экспериментальных режимов с равномерной подачей пара и ПДЛ равномерной перфорации

Были проведены эксперименты по определению гидравлического сопротивления ПДЛ с равномерной перфорацией 5,7%. В этих экспериментах осуществлялась одинаковая подача пара на холодную и горячую стороны модели, различие расходов на горячей и холодной половинах составляло не более 10%.

Суммарный расход подаваемого пара изменялся от 4,23 т/ч до 7,94 т/ч, соответствующие приведенные скорости пара на зеркале испарения: 0,15 – 0,29 м/с.

Основным параметром, характеризующим гидравлическое сопротивление ПДЛ, является перепад давления на ПДЛ. В экспериментах измерялось четыре перепада давления на ПДЛ (датчики RA01DP01, RA01DP02, RA01DP03, RA01DP04), два на горячей половине и два – на холодной.

На Рис. 2.2, Рис. 2.3, Рис. 2.4 показаны распределения перепадов давления на ПДЛ вдоль его длины для всех экспериментов по определению гидравлического сопротивления ПДЛ.

На этих рисунках кривые расположены в порядке увеличения суммарного расхода пара (от Рис. 2.2 к Рис. 2.4, кривые с меньшим расходом лежат ниже кривых с большим расходом). Здесь и на последующих рисунках координата  $x=0$  соответствует «левому» (на горячей половине) краю ПДЛ.

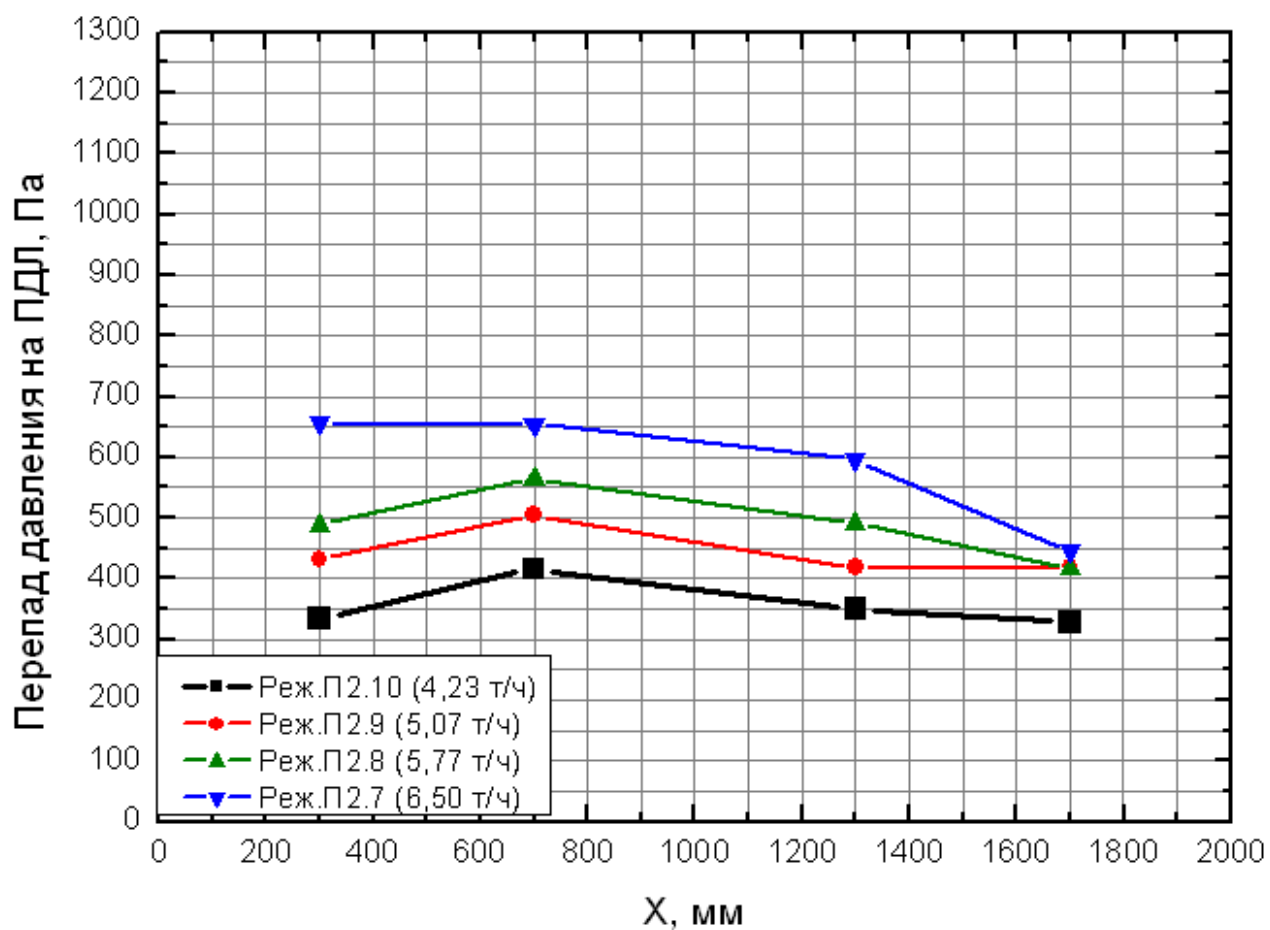


Рис. 2.2 – Распределение перепадов давления на ПДЛ вдоль его длины. На этом и следующих аналогичных в скобках указывается суммарный расход пара в режиме

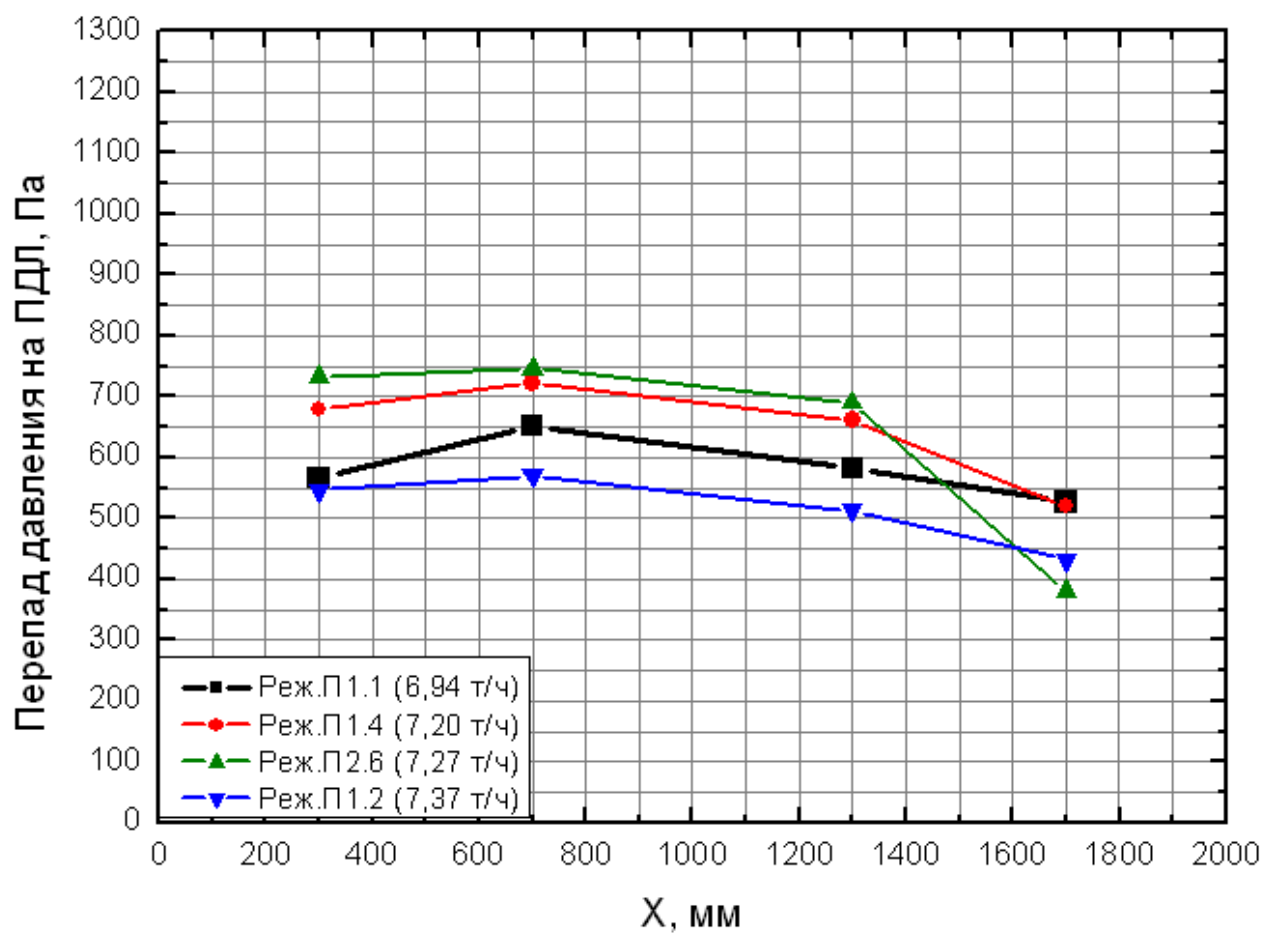


Рис. 2.3 – Распределение перепадов давления на ПДЛ вдоль его длины

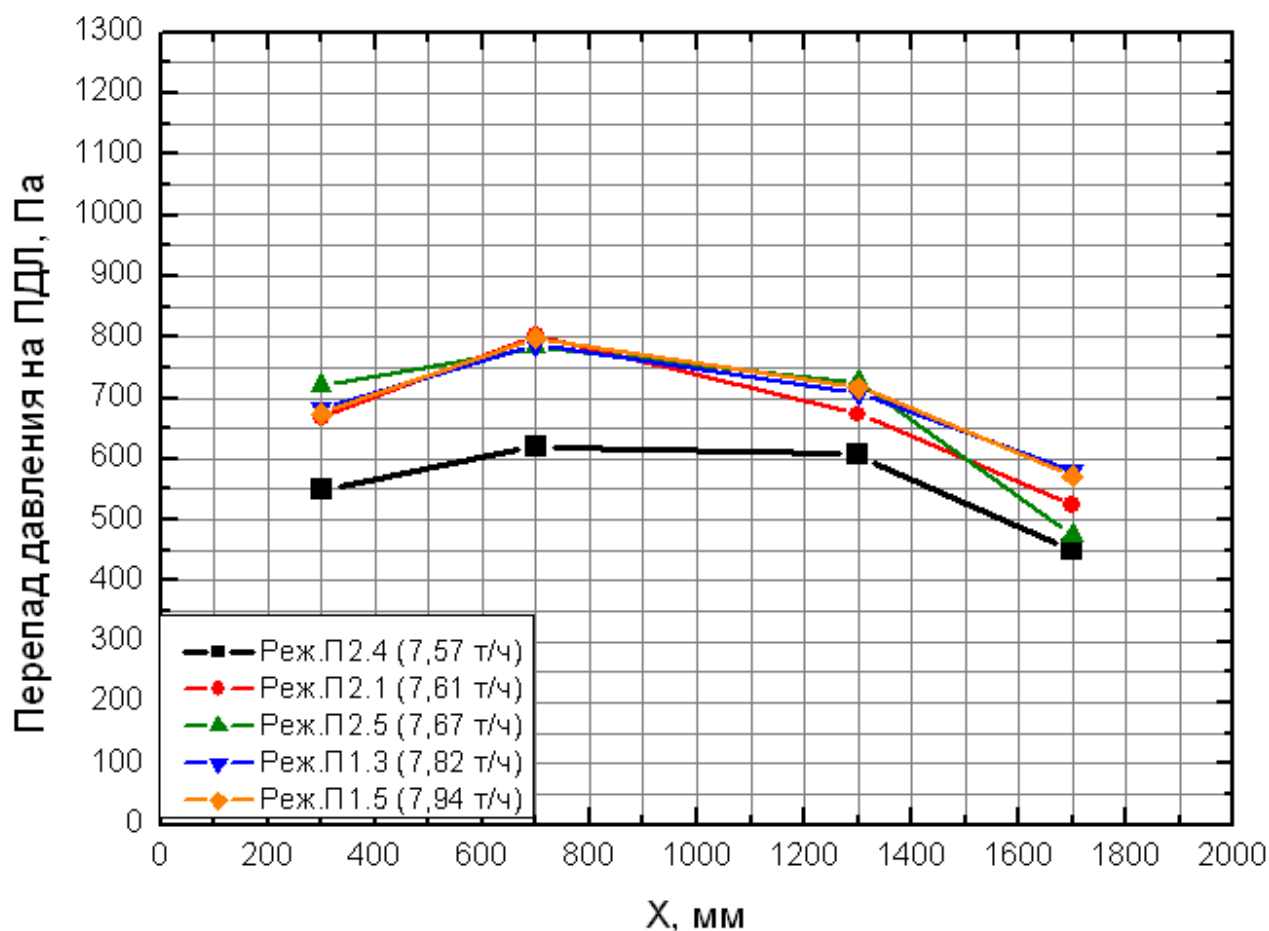


Рис. 2.4 – Распределение перепадов давления на ПДЛ вдоль его длины

Процесс течения пароводяной смеси в горизонтальном направлении под ПДЛ с равномерной перфорацией характеризуется распределением перепадов статического давления под ПДЛ (датчики RA01DP05, RA01DP06, RA01DP07). На Рис. 2.5 показано схематичное расположение этих датчиков под ПДЛ стенда. Направление течения пароводяной смеси, обозначенное стрелками, соответствует отрицательному перепаду давления по показанию датчика.



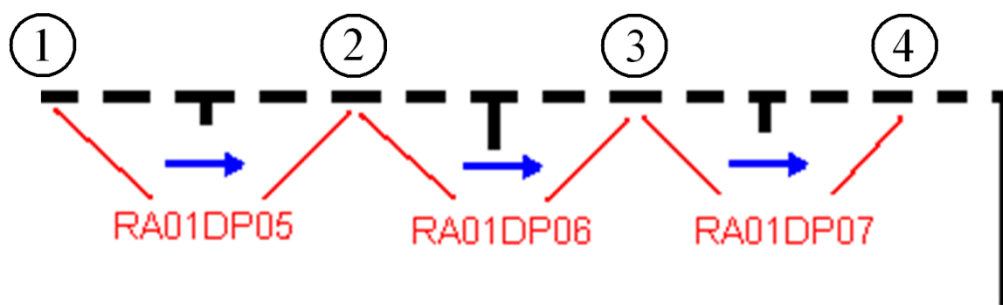


Рис. 2.5 – Расположение датчиков перепадов давления под ПДЛ

Для лучшего понимания процесса перетекания пароводяной смеси в ходе анализа экспериментальных данных была введена величина «относительное давление» под ПДЛ. Она определяется следующим образом:

- значение данной величины в точке 1 принимается нулем;
- значение в точке 2 равно показанию RA01DP05;
- значение в точке 3 равно сумме показаний датчиков RA01DP05 и RA01DP06;
- значение в точке 4 равно сумме показаний датчиков RA01DP05, RA01DP06 и RA01DP07.

Таким образом получается величина относительного давления в 4-х точках под ПДЛ стенда.

На Рис. 2.6, Рис. 2.7, Рис. 2.8 показаны распределения относительного давления под ПДЛ вдоль его длины для всех экспериментов по определению гидравлического сопротивления ПДЛ.

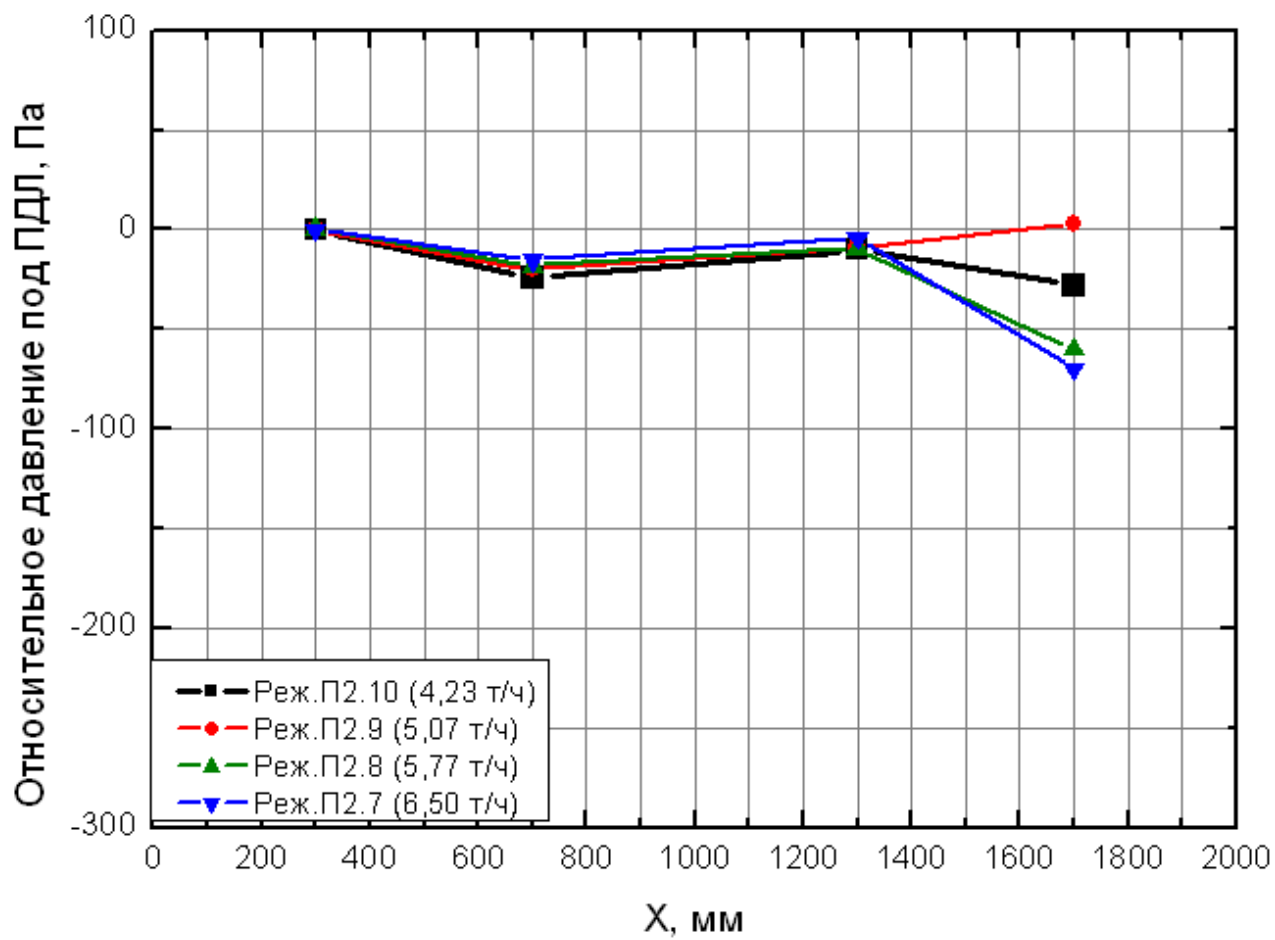


Рис. 2.6 – Распределение относительного давления под ПДЛ

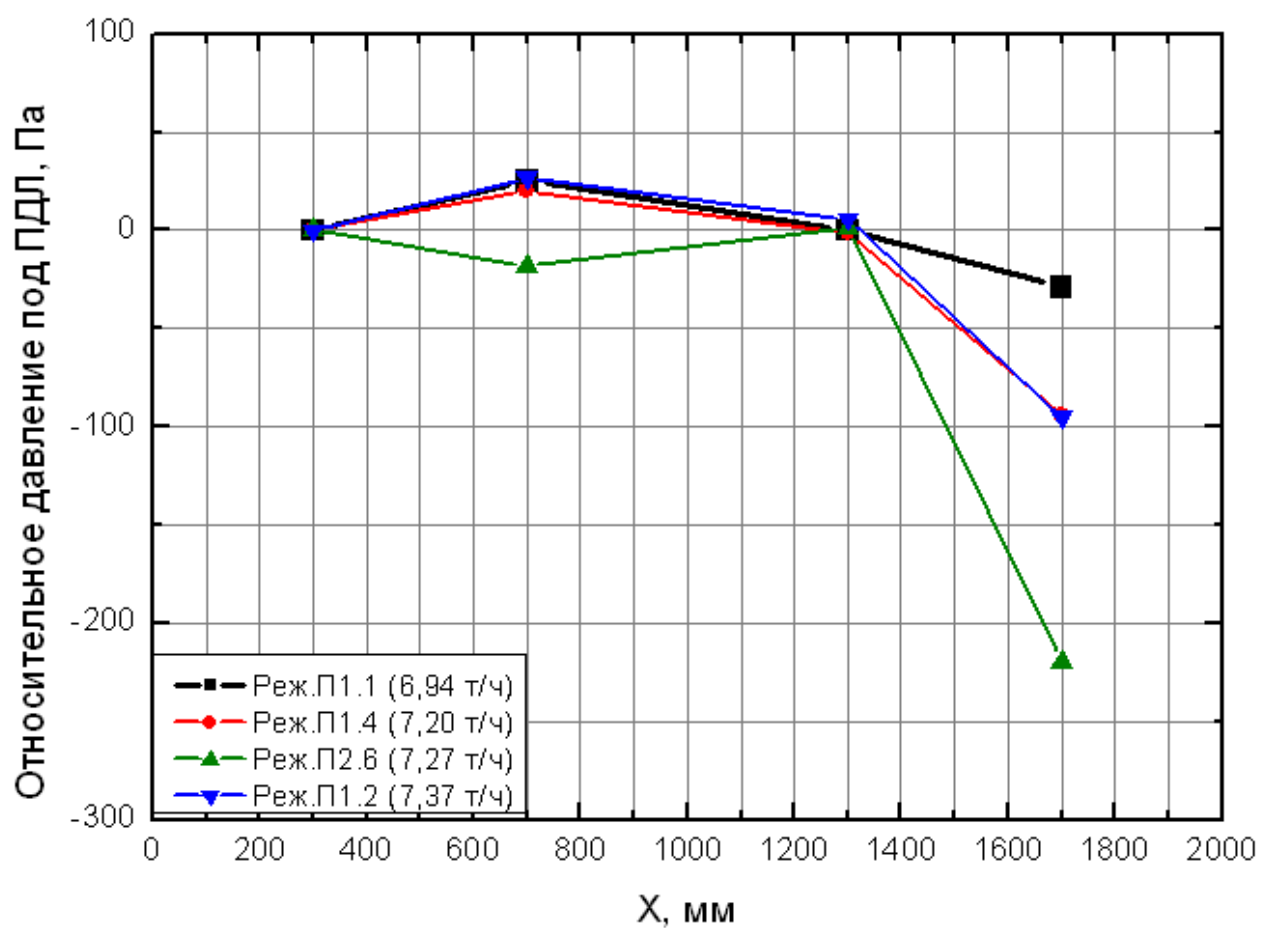


Рис. 2.7 – Распределение относительного давления под ПДЛ

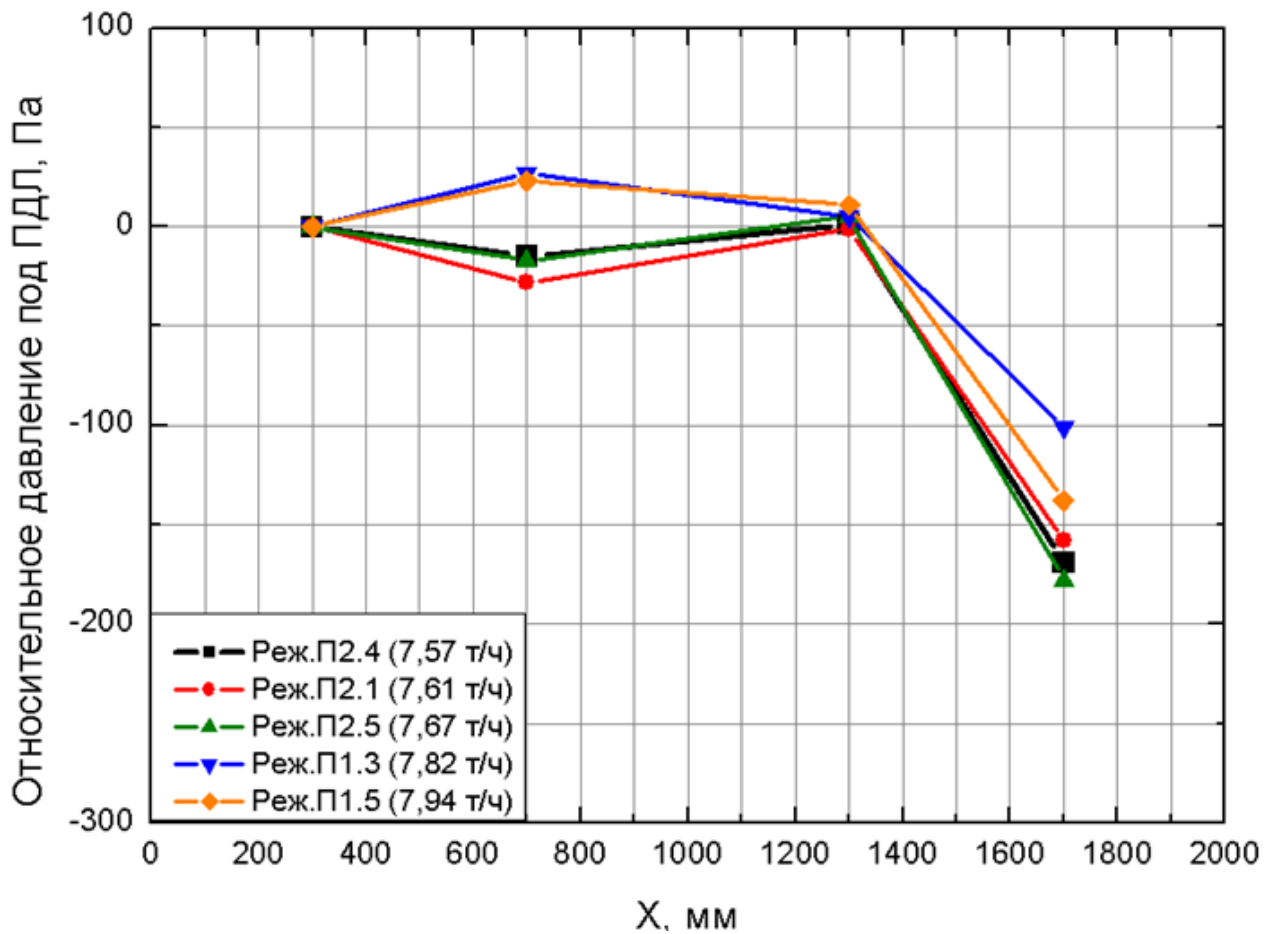


Рис. 2.8 – Распределение относительного давления под ПДЛ

Для рассматриваемых режимов построим распределения относительного давления над ПДЛ, которое определим следующим образом:

$$P_{\text{над\_ПДЛ}} = P_{\text{под\_ПДЛ}} - \Delta P_{\text{ПДЛ}} + const, \quad (2.1)$$

где  $P_{\text{над\_ПДЛ}}$  – относительное давление над ПДЛ,  $P_{\text{под\_ПДЛ}}$  – относительное давление под ПДЛ, определенное способом, описанным выше,  $\Delta P_{\text{ПДЛ}}$  – перепад давления на ПДЛ (одно из соответствующих показаний датчиков RA01DP01 – RA01DP04).

Поскольку относительное давление может отсчитываться от произвольного уровня, то величина  $const$  выбиралась таким образом, чтобы

значение относительного давления в верхнем отборе датчика RA01DP01 было равно нулю.

На Рис. 2.9, Рис. 2.10, Рис. 2.11 показаны распределения истинного объемного паросодержания под ПДЛ (датчики RA01V01, RA01V02), над ПДЛ (датчики RA01V03, RA01V04) и за закраиной (датчик RA01V05) для всех экспериментов по определению гидравлического сопротивления ПДЛ. Для наглядности на этом и аналогичных последующих рисунках условно показан ПДЛ с закраиной. На этих рисунках кривые расположены в порядке увеличения суммарного расхода пара (от Рис. 2.9 к Рис. 2.11).

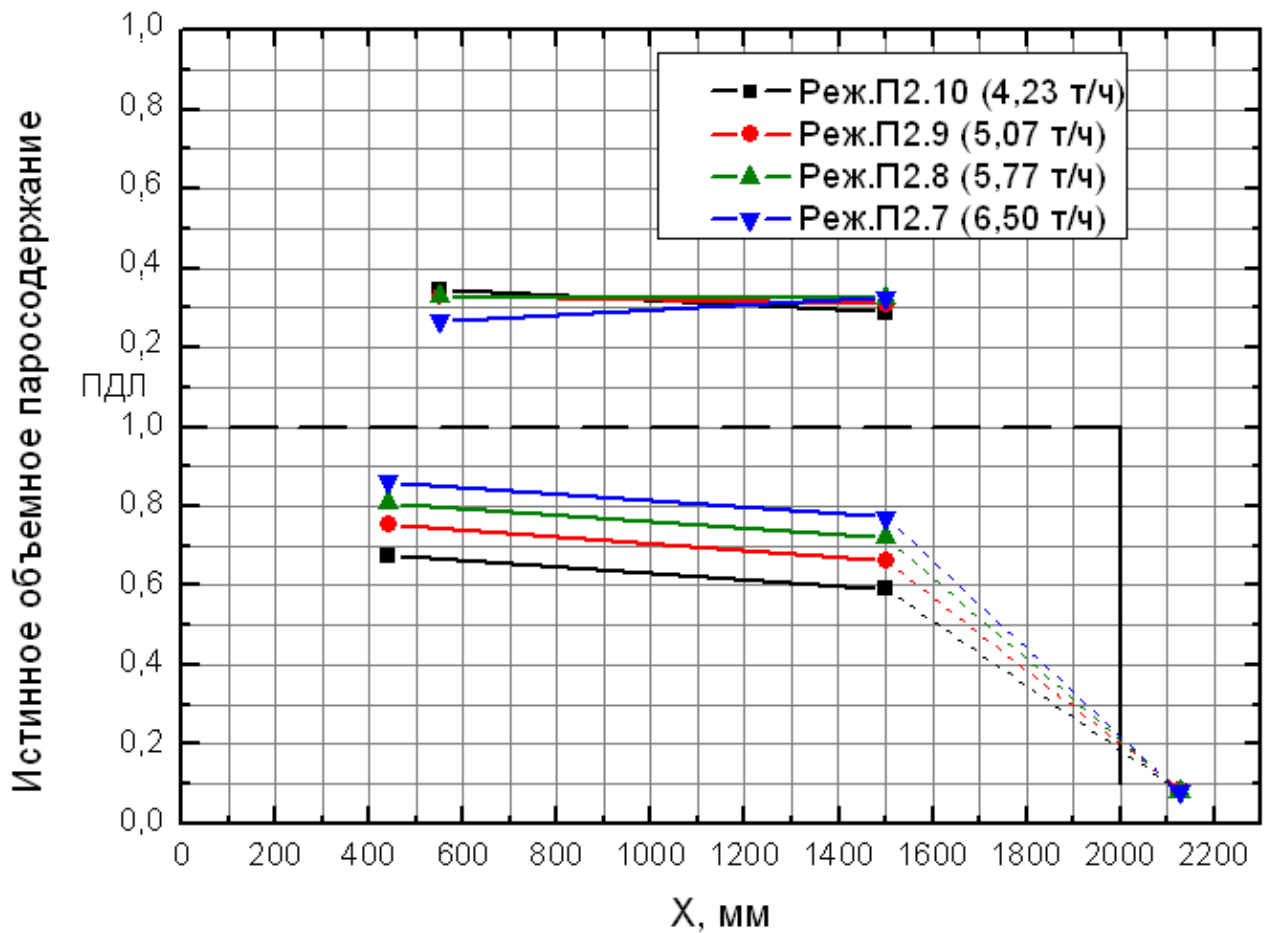


Рис. 2.9 – Распределение истинного объемного паросодержания в объеме модели

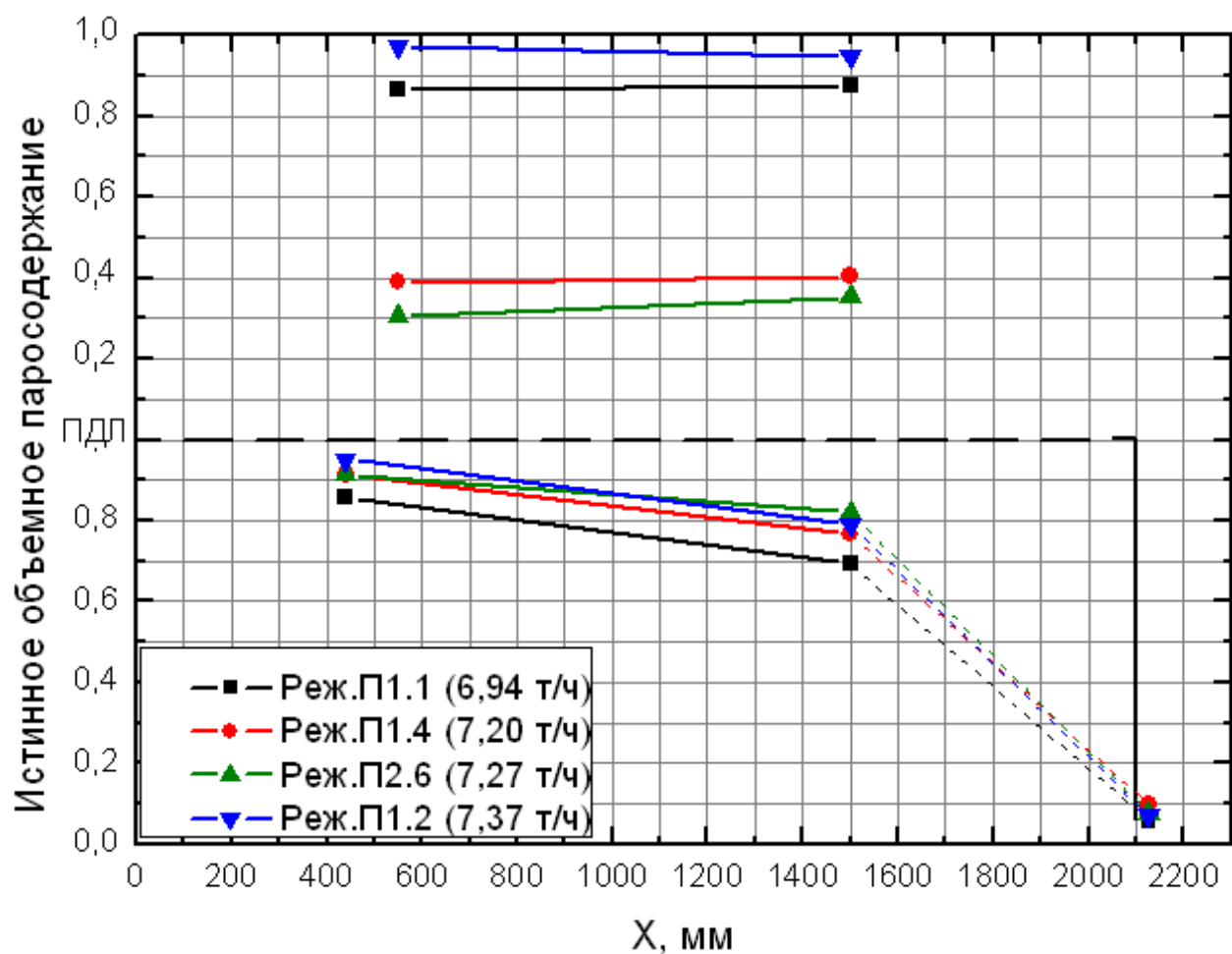


Рис. 2.10 – Распределение истинного объемного паросодержания в объеме модели

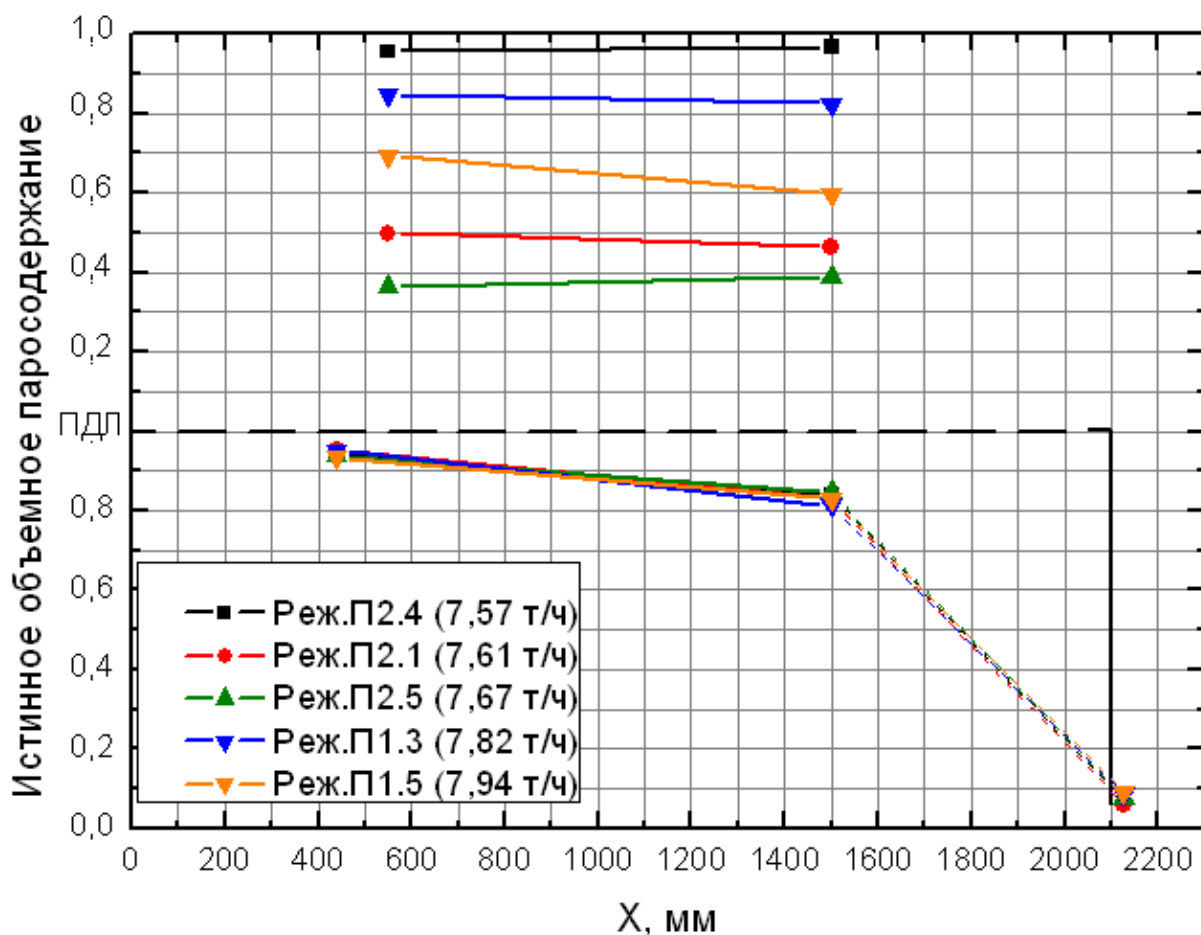


Рис. 2.11 – Распределение истинного объемного паросодержания в объеме модели

Поскольку в данных экспериментах использовались одинаковые расходы пара, подаваемого на горячую и холодную стороны, то распределения всех параметров вдоль ПДЛ относительно равномерны. Некоторая неравномерность обусловлена небольшим различием значений расходов пара, подаваемых на горячую и холодную стороны (до 10%), а также несимметричностью модели (слева ПДЛ примыкает непосредственно к стенке модели, а справа ПДЛ имеет закраину, при этом, через зазор «закраина-днище корпуса» реализуется циркуляция воды).

С увеличением расхода подаваемого пара возрастает перепад давления на ПДЛ (см. Рис. 2.2, Рис. 2.3, Рис. 2.4). Поскольку в данных экспериментах использовались одинаковые расходы, пара, подаваемого на горячую и холодную стороны, то заметного растекания пароводяной смеси под ПДЛ в горизонтальном направлении не наблюдается, о чем свидетельствует малое изменение относительного давления (Рис. 2.6, Рис. 2.7, Рис. 2.8).

При малых расходах пара истинное объемное паросодержание под ПДЛ относительно небольшое (см. Рис. 2.9), при увеличении расхода пара истинное объемное паросодержание под ПДЛ увеличивается. В некоторых режимах наблюдаются высокие значения истинного объемного паросодержания над ПДЛ (см. Рис. 2.10, Рис. 2.11). Это объясняется низким весовым уровнем над ПДЛ. Во всех выполненных экспериментах выявлена слабая зависимость основных параметров от весового уровня над ПДЛ, поэтому его значения на рисунках не приводятся.



## 2.2.2 Определение гидравлического сопротивления ПДЛ

### Определение коэффициента гидравлического сопротивления ПДЛ двухфазному потоку на основе полученных экспериментальных данных

Примем, что потери давления (гидросопротивление) на ПДЛ определяются следующей формулой:

$$\Delta P_{\text{ПДЛ}} = \xi \cdot \frac{\rho'' (w''_{\text{отв}})^2}{2} \cdot \Psi, \quad (2.2)$$

где  $\Delta P_{\text{ПДЛ}}$  – потери давления на ПДЛ,  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления ПДЛ однофазному потоку,  $\rho''$  – плотность пара,  $w''_{\text{отв}}$  – приведенная скорость пара в отверстиях ПДЛ ( $w''_{\text{отв}} = \frac{G}{\rho'' S_{\text{отв}}}$ );  $G$  – суммарный расход подаваемого пара,  $S_{\text{отв}}$  – суммарная площадь отверстий ПДЛ;  $\Psi$  – коэффициент, учитывающий поправку на двухфазность потока.

Из формулы (2.2) определим коэффициент  $\Psi$ :

$$\Psi = \frac{2\Delta P_{\text{ПДЛ}}}{\xi \rho'' (w''_{\text{отв}})^2} = \frac{2\Delta P_{\text{ПДЛ}} \rho'' S_{\text{отв}}^2}{\xi (G)^2} = \frac{\xi_{\text{эксп}}}{\xi}, \quad (2.3)$$

где  $\xi_{\text{эксп}} = \frac{2\Delta P_{\text{ПДЛ}} \rho'' S_{\text{отв}}^2}{(G)^2}$ .

Плотность пара определяется по таблицам свойств воды и водяного пара [39] в соответствии с давлением насыщения, значение которого определяется датчиком RA01P01.

Потери давления на ПДЛ определим по измерениям перепада давления на ПДЛ (RA01DP01, RA01DP02, RA01DP03, RA01DP04) за вычетом гидростатического перепада давления между отборами датчиков. В качестве перепада давления на ПДЛ примем среднее арифметическое показаний четырех

датчиков перепадов давления на ПДЛ (RA01DP01, RA01DP02, RA01DP03, RA01DP04).

Гидростатический перепад давления определим следующим образом:

$$\Delta P_{\text{гидростат}} = \rho'(1 - \bar{\varphi}_{\text{над ПДЛ}})gh + \rho''\bar{\varphi}_{\text{над ПДЛ}}gh + \rho'(1 - \bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}})gh + \rho''\bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}}gh, \quad (2.4)$$

где  $\bar{\varphi}_{\text{над ПДЛ}} = \frac{\varphi_3 + \varphi_4}{2}$ ,  $\bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$ ,  $h$  – расстояние от ПДЛ до соответствующей точки отбора ( $h = 10$  мм).

В результате потери давления на ПДЛ будут определяться следующей формулой:

$$\Delta P_{\text{ПДЛ}} = \frac{\text{RA01DP01} + \text{RA01DP02} + \text{RA01DP03} + \text{RA01DP04}}{4} - \Delta P_{\text{гидростат}} \quad (2.5)$$

Площадь отверстий ПДЛ для степени перфорации 5,7 % равна:

$$S_{\text{отв}} = 0,057 \cdot 2,1 \cdot 0,1 = 0,01197 \text{ м}^2 \quad (2.6)$$

Результаты расчетов величины  $\xi_{\text{эксп}} = \frac{2\Delta P_{\text{ПДЛ}}\rho''S_{\text{отв}}^2}{(G)^2}$  для данных экспериментальных режимов приведены в Табл. 2.4, Табл. 2.5. В дальнейшем эту величину будем называть коэффициентом гидравлического сопротивления ПДЛ двухфазному потоку, определенным на основе полученных экспериментальных данных.

Табл. 2.4 – Расчет гидростатического перепада давления

№ режима	RA01V01	RA01V02	RA01V03	RA01V04	$\bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}}$	$\bar{\varphi}_{\text{над ПДЛ}}$	$\Delta P_{\text{гидростат}}$
П1.1	0,859	0,692	0,864	0,875	0,776	0,869	31,65
П1.2	0,951	0,79	0,972	0,946	0,871	0,959	18,89
П1.3	0,951	0,812	0,849	0,824	0,882	0,837	26,54
П1.4	0,913	0,765	0,39	0,404	0,839	0,397	59,86
П1.5	0,933	0,83	0,694	0,596	0,882	0,645	39,79
П2.1	0,95	0,828	0,498	0,463	0,889	0,481	50,62
П2.4	0,946	0,837	0,956	0,967	0,892	0,962	17,23
П2.5	0,938	0,846	0,364	0,388	0,892	0,376	57,65
П2.6	0,914	0,819	0,306	0,352	0,867	0,329	62,62
П2.7	0,861	0,771	0,268	0,325	0,816	0,296	68,41
П2.8	0,807	0,721	0,331	0,325	0,764	0,328	69,79
П2.9	0,752	0,664	0,328	0,309	0,708	0,319	74,28
П2.10	0,675	0,591	0,344	0,289	0,633	0,317	79,59

Табл. 2.5 – Результаты расчетов коэффициента гидравлического сопротивления ПДЛ двухфазному потоку на основе полученных экспериментальных данных. Степень перфорации ПДЛ составляет 5,7%.

№ режима	RT01F02, т/ч	RT01F03, т/ч	G, т/ч	$w''_{\text{отв}}$ , м/с	RA01DP01, Па	RA01DP02, Па	RA01DP03, Па	RA01DP04, Па	$\Delta P_{\text{гидростат}}$	$\Delta P_{\text{ПДЛ}}$ , Па	$\xi_{\text{эксп}}$
П1.1	3,49	3,45	6,94	4,41	566	652	583	527	31,65	550,35	1,55
П1.2	3,87	3,50	7,37	4,69	516	570	513	433	18,89	489,11	1,22
П1.3	3,93	3,89	7,82	4,97	684	787	708	581	26,54	663,46	1,47
П1.4	3,72	3,48	7,2	4,58	679	723	662	520	59,86	586,14	1,53
П1.5	4,01	3,93	7,94	5,05	674	799	717	571	39,79	650,46	1,40
П2.1	3,81	3,80	7,61	4,83	667	803	673	525	50,62	616,38	1,44
П2.4	3,78	3,79	7,57	4,81	550	620	607	450	17,23	539,52	1,28
П2.5	3,84	3,83	7,67	4,88	720	783	726	475	57,65	618,35	1,43
П2.6	3,64	3,63	7,27	4,62	732	746	690	380	62,62	574,38	1,47
П2.7	3,26	3,24	6,5	4,13	658	655	596	445	68,41	520,09	1,67
П2.8	2,90	2,87	5,77	3,67	488	565	491	415	69,79	419,96	1,71
П2.9	2,55	2,52	5,07	3,22	432	504	418	420	74,28	369,22	1,95
П2.10	2,13	2,10	4,23	2,69	335	416	351	328	79,59	277,91	2,11

### Расчет коэффициента гидравлического сопротивления ПДЛ однофазному потоку

Существует несколько способов расчета коэффициента гидравлического сопротивления для однофазного потока. Число Рейнольдса ( $Re$ ), определенное по скорости пара в отверстии ПДЛ и его диаметру, может принимать значение как меньше  $10^5$ , так и больше  $10^5$ . При этом в справочнике [38] рекомендуется при  $Re < 10^5$  учитывать зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса, а при  $Re > 10^5$  предлагается независимая от числа Рейнольдса формула. Следует отметить, что при  $Re = 10^5$  есть существенный разрыв коэффициента гидравлического сопротивления для этих случаев (2,09 при учете  $Re$  и 2,31 без учета  $Re$ ). Кроме справочника [38] есть статья [17], в которой приведены опытные данные по коэффициентам гидравлического сопротивления ПДЛ. Будем рассматривать все три случая.

### *Расчет коэффициента гидравлического сопротивления ПДЛ однофазному потоку по [38] с учетом числа Рейнольдса.*

Для этой цели в [38] предлагается следующая процедура. Коэффициент гидравлического сопротивления (будем его обозначать  $\xi_{ид1}$ ) вычисляется по следующей формуле:

$$\xi_{ид1} = \frac{\xi_{\Phi}}{\bar{f}^2} + \bar{\varepsilon}_{0Re} \cdot \xi_{1кв} \quad (2.7)$$

где  $\bar{f}$  – степень перфорации ПДЛ. Значения параметров  $\bar{\varepsilon}_{0Re}$ ,  $\xi_{\Phi}$  определяются с помощью линейной интерполяции между ближайшими соответствующими значениями в таблицах на стр. 413 [38]. Величина  $\xi_{1кв}$  определяется по формуле:

$$\xi_{1KB} = \left( 0,5(1-\bar{f})^{0,75} + \tau(1-\bar{f})^{1,375} + (1-\bar{f})^2 + \lambda \frac{l}{d_{отв}} \right) \quad (2.8)$$

где параметр  $\tau$  вычисляется следующим образом:

$$\tau = (2,4 - \bar{l})^{-\varphi(\bar{l})} \quad (2.9)$$

$$\varphi(\bar{l}) = 0,25 + 0,535\bar{l}^8 / (0,05 + \bar{l}^7) \quad (2.10)$$

$$\bar{l} = l/d_{отв} \quad (2.11)$$

где  $l$  – толщина ПДЛ;  $d_{отв}$  – диаметр отверстий ПДЛ,  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трения единицы относительной длины ( $\bar{l} = 1$ ) участка.

Результаты расчетов по приведенной методике коэффициента гидравлического сопротивления для рассматриваемых экспериментальных режимов представлены в Табл. 2.6.

Табл. 2.6 – Расчет коэффициента гидравлического сопротивления однофазного потока пара по [38] с учетом числа Рейнольдса

№ режима	$G$ , т/ч	$w''_{отв}$ , м/с	$Re$	$\xi_{ид1}$
П1.1	6,94	4,41	110943	2,12
П1.2	7,37	4,69	117551	2,15
П1.3	7,82	4,97	124420	2,17
П1.4	7,20	4,58	114728	2,16
П1.5	7,94	5,05	126156	2,16
П2.1	7,61	4,83	120631	2,16
П2.4	7,57	4,81	120605	2,16
П2.5	7,67	4,88	122083	2,11
П2.6	7,27	4,62	115252	2,10
П2.7	6,50	4,13	103162	2,09
П2.8	5,77	3,67	92070	2,07
П2.9	5,07	3,22	80148	2,12
П2.10	4,23	2,69	67117	2,15

*Коэффициент гидравлического сопротивления ПДЛ однофазному потоку по [38] без учета числа Рейнольдса*

Согласно [38] при  $Re > 10^5$  коэффициент сопротивления ПДЛ с перфорацией 5,7% составляет  $\xi_{ид2} = 2,31$ .

*Коэффициент гидравлического сопротивления ПДЛ однофазному потоку по [17]*

Результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления дырчатых листов [17] показывают, что коэффициент сопротивления листа с перфорацией 5,7% составляет  $\xi_{кар} = 2,0$ .

*Исследование влияния двухфазности потока на гидросопротивление ПДЛ*

На основе данных Табл. 2.4, Табл. 2.5 и значений коэффициента гидравлического сопротивления ПДЛ, рассчитанных выше по трем различными методикам, определим коэффициент  $\Psi$ , характеризующий поправку на двухфазность потока, см. Табл. 2.7.

Табл. 2.7 – Значения коэффициента  $\Psi$  для различных методик определения коэффициента гидравлического сопротивления ПДЛ

№ режима	$\xi_{\text{эксп}}$	$\xi_{\text{ид1}}$	$\xi_{\text{ид2}}$	$\xi_{\text{кар}}$	$\Psi_{\text{ид1}}$	$\Psi_{\text{ид2}}$	$\Psi_{\text{кар}}$
П1.1	1,55	2,12	2,31	2,0	0,73	0,67	0,78
П1.2	1,22	2,15	2,31	2,0	0,57	0,53	0,61
П1.3	1,47	2,17	2,31	2,0	0,68	0,64	0,73
П1.4	1,53	2,16	2,31	2,0	0,71	0,66	0,77
П1.5	1,40	2,16	2,31	2,0	0,65	0,61	0,70
П2.1	1,44	2,16	2,31	2,0	0,67	0,62	0,72
П2.4	1,28	2,16	2,31	2,0	0,59	0,55	0,64
П2.5	1,43	2,11	2,31	2,0	0,68	0,62	0,71
П2.6	1,47	2,1	2,31	2,0	0,70	0,64	0,73
П2.7	1,67	2,09	2,31	2,0	0,80	0,72	0,83
П2.8	1,71	2,07	2,31	2,0	0,83	0,74	0,85
П2.9	1,95	2,12	2,31	2,0	0,92	0,84	0,97
П2.10	2,11	2,15	2,31	2,0	0,98	0,91	1,05

Здесь  $\Psi_{\text{ид1}} = \frac{\xi_{\text{эксп}}}{\xi_{\text{ид1}}}$ ,  $\Psi_{\text{ид2}} = \frac{\xi_{\text{эксп}}}{\xi_{\text{ид2}}}$ ,  $\Psi_{\text{кар}} = \frac{\xi_{\text{эксп}}}{\xi_{\text{кар}}}$ .

Из анализа Табл. 2.7 следует, что коэффициент  $\Psi$ , характеризующий поправку на двухфазность потока, в исследуемом диапазоне параметров меньше единицы за исключением единственного режима П2.10. Очевидно, что при дальнейшем уменьшении расхода подаваемого пара этот коэффициент был бы больше единицы.

Следует отметить, что во всех известных формулах [17, 40, 41] для определения гидравлического сопротивления двухфазного пароводяного потока наличие воды в двухфазной смеси увеличивает коэффициент гидравлического сопротивления по сравнению с коэффициентом для чистого пара, то есть всегда коэффициент  $\Psi > 1$ .

Рассмотрим, как зависит коэффициент  $\Psi$  от объемного паросодержания под ПДЛ. В экспериментах измерялось два значения объемного паросодержания под ПДЛ RA01V01 (на горячей половине) и RA01V02 (на холодной половине). Определим среднее объемное паросодержание под ПДЛ как:



$$\bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}} = \frac{(RA01V01 + RA01V02)}{2} \quad (2.12)$$

В Табл. 2.8 приведены соответствующие параметры для каждого режима.

Табл. 2.8 – Зависимость коэффициента  $\Psi$  от объемного паросодержания под ПДЛ

№ режима	RA01V01	RA01V02	$\bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}}$	$\Psi_{\text{ид1}}$	$\Psi_{\text{ид2}}$	$\Psi_{\text{кар}}$
П1.1	0,859	0,692	0,776	0,72	0,66	0,77
П1.2	0,951	0,79	0,871	0,56	0,52	0,61
П1.3	0,951	0,812	0,882	0,67	0,63	0,73
П1.4	0,913	0,765	0,839	0,70	0,66	0,76
П1.5	0,933	0,83	0,882	0,64	0,60	0,70
П2.1	0,95	0,828	0,889	0,66	0,62	0,72
П2.4	0,946	0,837	0,892	0,58	0,55	0,63
П2.5	0,938	0,846	0,892	0,67	0,61	0,71
П2.6	0,914	0,819	0,867	0,70	0,63	0,73
П2.7	0,861	0,771	0,816	0,79	0,71	0,83
П2.8	0,807	0,721	0,764	0,82	0,73	0,85
П2.9	0,752	0,664	0,708	0,91	0,83	0,96
П2.10	0,675	0,591	0,633	0,96	0,89	1,03

На Рис. 2.12 – Рис. 2.14 показаны зависимости коэффициента  $\Psi$  от объемного паросодержания под ПДЛ.

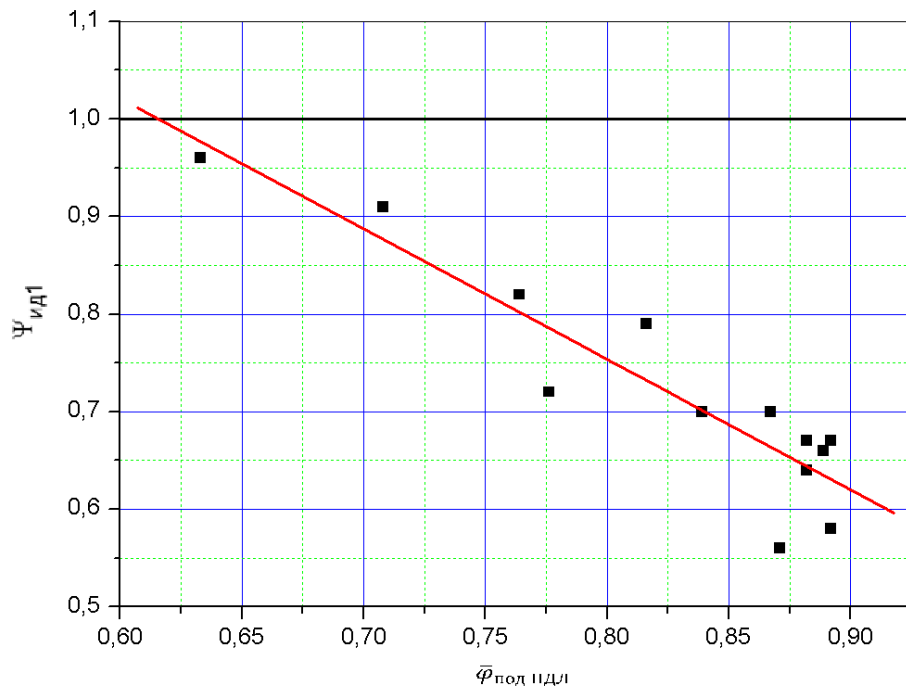


Рис. 2.12 – Зависимость  $\Psi_{ид1}$  от среднего объемного паросодержания под ПДЛ. Прямая линия описывается уравнением  $\Psi_{ид1} = 1,82 - 1,34 \cdot \bar{\varphi}_{под ПДЛ}$ , которое аппроксимирует полученные данные

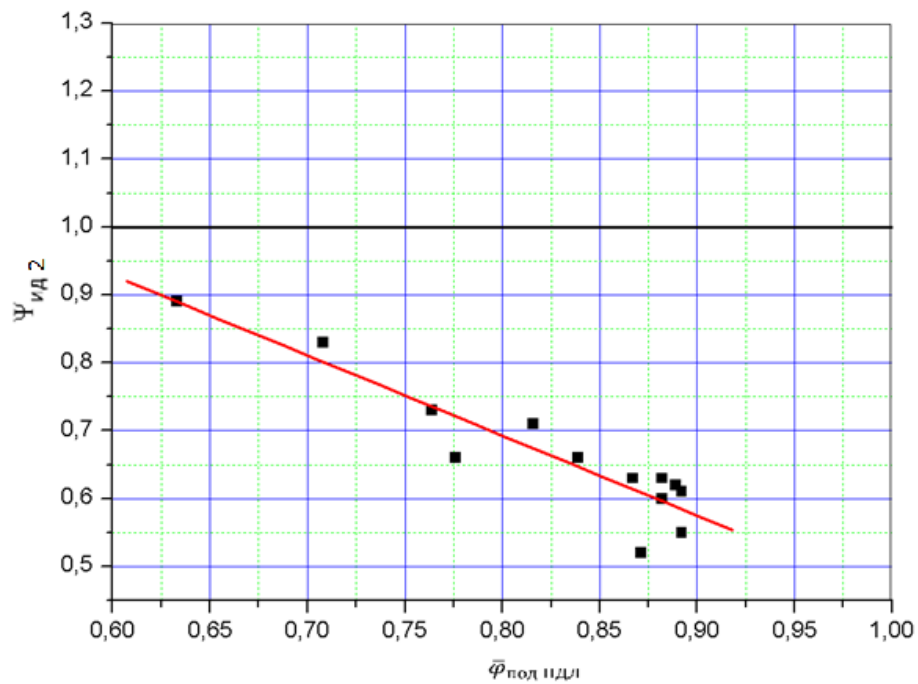


Рис. 2.13 – Зависимость  $\Psi_{ид2}$  от среднего объемного паросодержания под ПДЛ. Прямая линия описывается уравнением  $\Psi_{ид2} = 1,64 - 1,18 \cdot \bar{\varphi}_{под ПДЛ}$

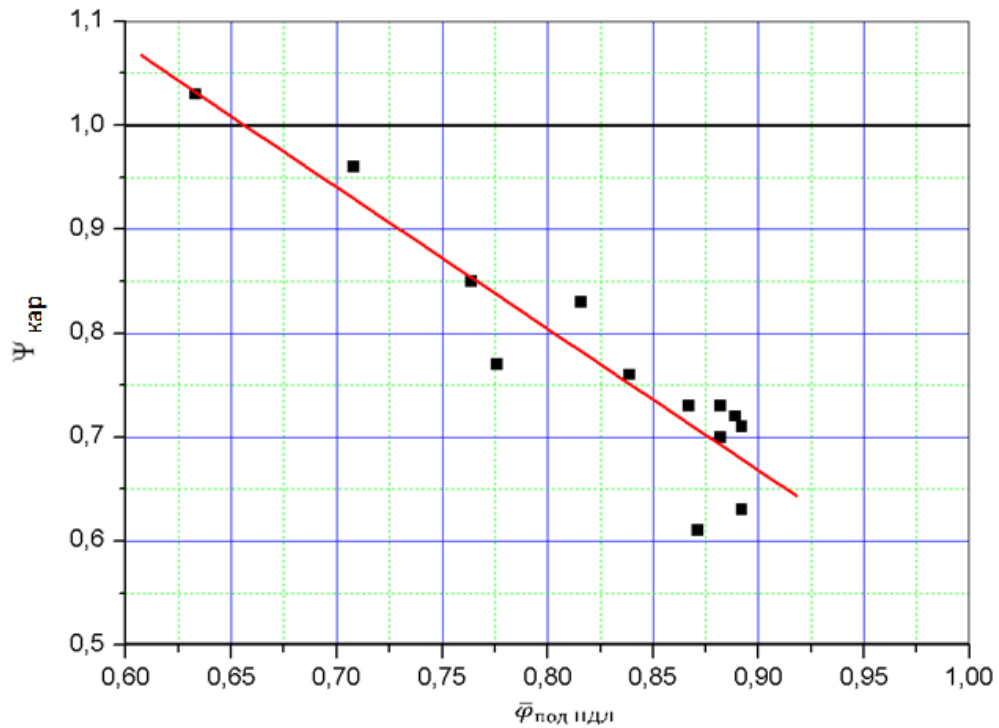


Рис. 2.14 – Зависимость  $\Psi_{\text{кар}}$  от среднего объемного паросодержания под ПДЛ.

Прямая линия описывается уравнением  $\Psi_{\text{кар}} = 1,90 - 1,36 \cdot \bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}}$

На всех трех графиках прослеживается одинаковая зависимость – с увеличением среднего объемного паросодержания под ПДЛ коэффициент  $\Psi$ , характеризующий поправку на двухфазность потока, уменьшается.

На Рис. 2.15 сопоставлены все три уравнения, аппроксимирующие зависимость  $\Psi$  от  $\bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}}$ . Все три прямые лежат достаточно близко друг от друга.

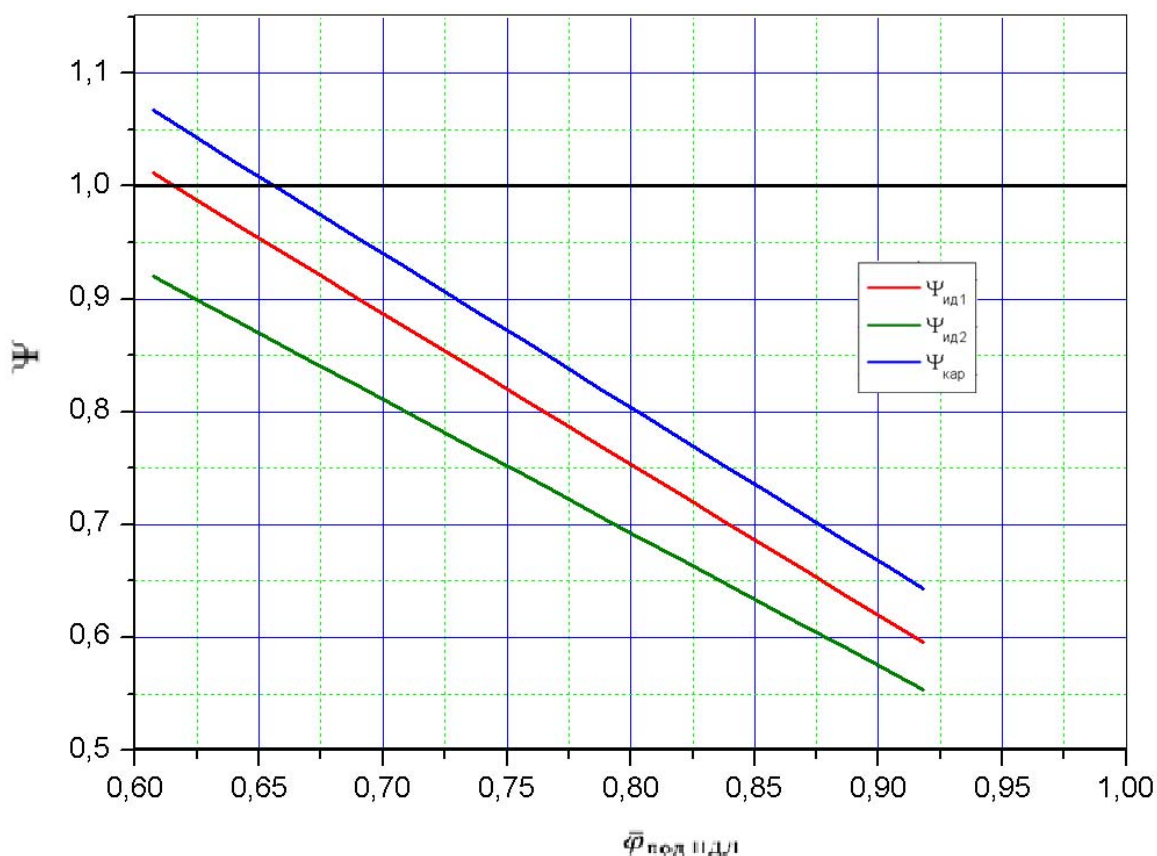


Рис. 2.15 – Сравнения аппроксимационных зависимостей  $\Psi$  от  $\bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}}$

Таким образом, в ходе выполнения экспериментов на стенде ПГВ с равномерной перфорацией ПДЛ и с одинаковой подачей пара на обе стороны модели ПГВ установлено, что в области больших объемных паросодержаний гидравлическое сопротивление ПДЛ двухфазному пароводяному потоку становится меньше, чем в случае течения чистого пара с расходом, равным расходу пара в двухфазном потоке.

### Обсуждение полученных результатов исследований по гидросопротивлению ПДЛ

Полученные в настоящем экспериментальном исследовании значения коэффициента сопротивления ПДЛ  $\xi_{\text{эксп}}$  находятся в диапазоне 1,21 ÷ 2,06 (для листа с живым сечением 5,7%), что заметно меньше, чем значения, обычно применяемые в расчетах.

Следует отметить, что в [42] для ПДЛ с относительным живым сечением 3,7% также указывается на подобную закономерность: «Обращает на себя внимание несоответствие величины коэффициента гидравлического сопротивления ПДЛ, полученного опытным путем и рассчитанного по рекомендациям [43]. Величина  $\xi_{\text{ПДЛ}}$  парогенератора ПГВ-1000 составляет по данным [43]  $\xi_{\text{ПДЛ}} = 2,2$ , в то время как опытное его значение с учетом выноса влаги оказалось равным  $\approx 1$ .»

Возможным объяснением этой закономерности является следующее.

Коэффициенты сопротивления шайб, диафрагм, решеток и т.п., приведенные в [17, 38] определялись по результатам продувки этих устройств в трубах. Следует отметить, что двухфазная гидродинамика, реализующаяся в окрестности ПДЛ, существенно отличается от напорного течения через решетку.

В случае напорного течения двухфазный поток в трубе формируется с помощью независимых подводов пара и воды. Потоки воды и пара перемешиваются в смесителе, после чего двухфазная смесь поступает на исследуемую решетку, а после нее покидает рабочий участок.

В случае работы ПДЛ в составе ПГ ситуация иная. Генерируемый (подаваемый на стенде) пар поднимается сквозь трубчатку под ПДЛ, растекается под листом и под действием гидростатического напора воды за закраиной проходит в отверстия ПДЛ, а затем барботирует в двухфазном динамическом слое над ПДЛ и выходит в паровое пространство. Вблизи ПДЛ формируется контур циркуляции воды: она выносится паром на ПДЛ, движется в сторону закраины, сливается в зазор между закраиной и корпусом и возвращается опять в пространство под ПДЛ.

Такие существенные особенности двухфазной гидродинамики вблизи ПДЛ отражаются на величине гидросопротивления ПДЛ в различных режимах его работы.

При малых объемных паросодержаниях под ПДЛ двухфазная смесь в сильной степени гомогенизирована. Её течение через ПДЛ можно рассматривать как течение гомогенной среды с плотностью большей плотности пара. Поэтому гидросопротивление ПДЛ в этом случае будет превышать гидросопротивление, которое оказывает ПДЛ однофазному потоку пара с тем же расходом.

С увеличением объемного паросодержания под ПДЛ двухфазная среда вблизи ПДЛ переходит в дисперсный режим, в котором пар является непрерывной фазой, а вода присутствует в виде капель. Часть капель при прохождении через отверстия ПДЛ осаждаются на их стенках. Вследствие этого, на стенках образуется жидкая пленка [30]. Наличие этой пленки сглаживает острые кромки отверстий, вследствие чего уменьшается потери давления на отверстиях.

Для проверки этой гипотезы было выполнено численное исследование следующей модельной задачи.

Рассматривается течение пара через отверстие ПДЛ, причем на нижней поверхности ПДЛ задается небольшой расход воды, приводящий к образованию тонкого жидкого слоя на этой поверхности, см. Рис. 2.16.

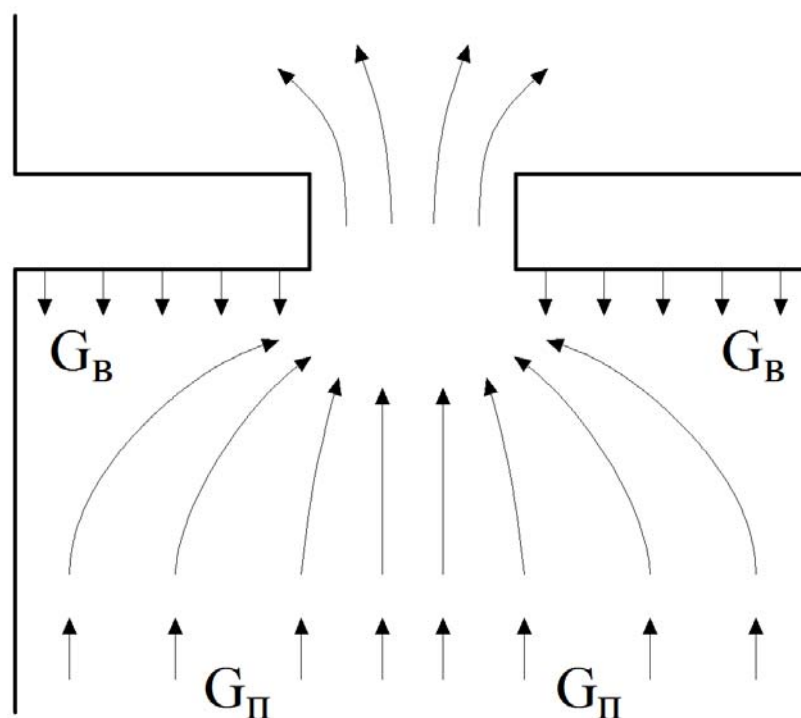


Рис. 2.16 – Постановка модельной задачи

Движение воды и пара рассматривались в приближении вязкой несжимаемой жидкости, турбулентность описывалась с помощью  $k$ - $\epsilon$  модели. Эволюция межфазной поверхности моделировалась методом VOF [31]. Задача решалась в осесимметричной постановке.

Рассматривались параметры для условий экспериментов, описанных в Главе 2: диаметр отверстия 13 мм, толщина ПДЛ 6 мм, приведенная скорость пара 0,26 м/с. Диаметр расчетной области выбирался исходя из степени перфорации 5,7%. Значения плотностей и динамических вязкостей фаз, а также коэффициента поверхностного натяжения выбирались при давлении насыщения 7 МПа. Расход воды задавался таким образом, чтобы за характерное время исследуемого процесса, когда устанавливается перепад давления на ПДЛ, на нижней поверхности ПДЛ формировался тонкий слой жидкости.

На Рис. 2.17 показана рассчитанная картина течения пара в районе входной кромки отверстия ПДЛ без жидкой пленки (Рис. 2.17, а) и при ее

наличии (Рис. 2.17, б). Видно, что жидкая пленка сглаживает острую кромку отверстия, способствуя более плавному вхождению пара в отверстие.

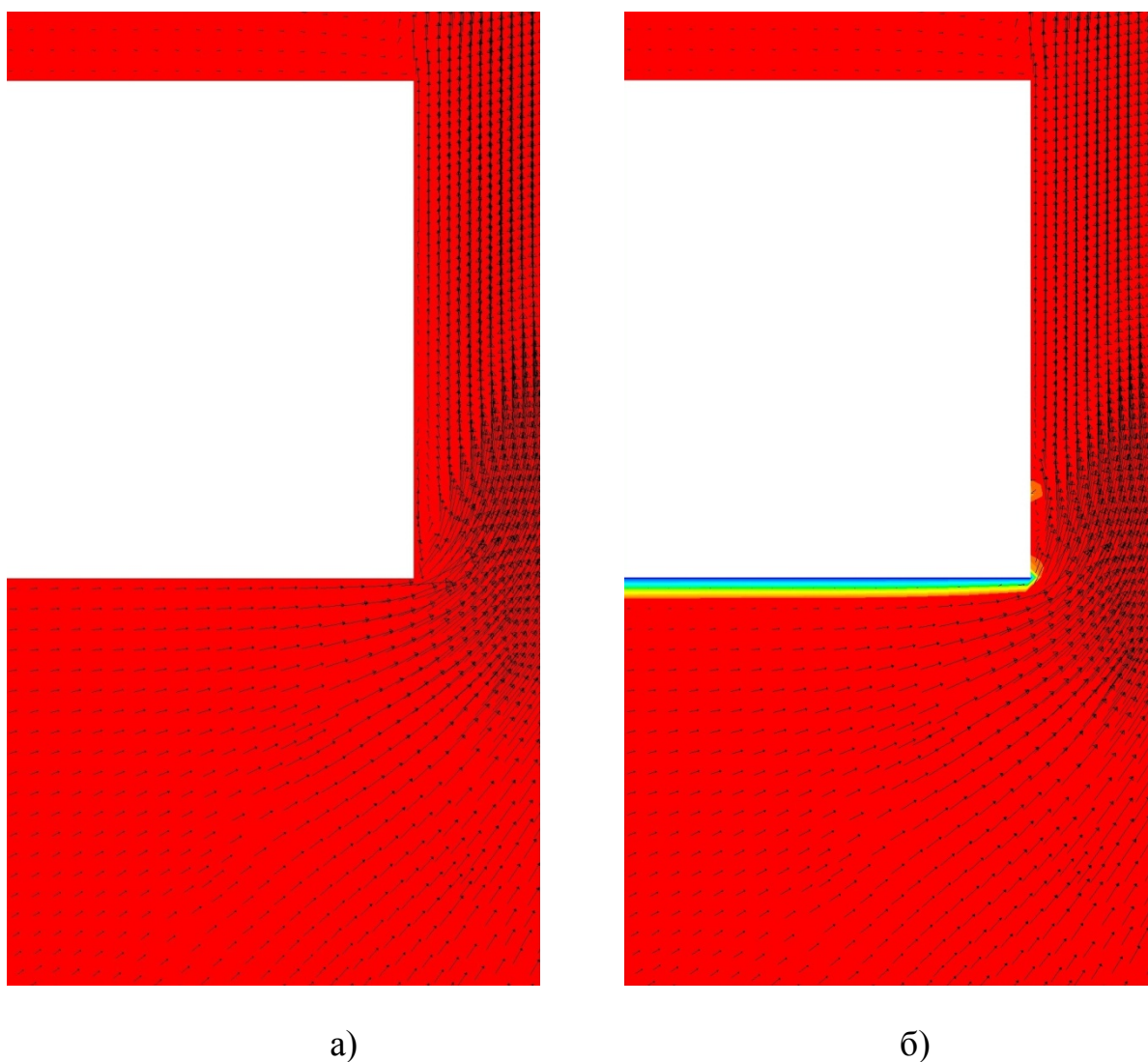


Рис. 2.17 – Поле скорости пара в районе входной кромки отверстия ПДЛ  
а) – без жидкой пленки; б) – с жидкой пленкой;  
синий цвет – вода, красный цвет – пар.

На Рис. 2.18 показано распределение давления вдоль оси для двух случаев: 1) течение без пленки жидкости, 2) течение с пленкой жидкости.



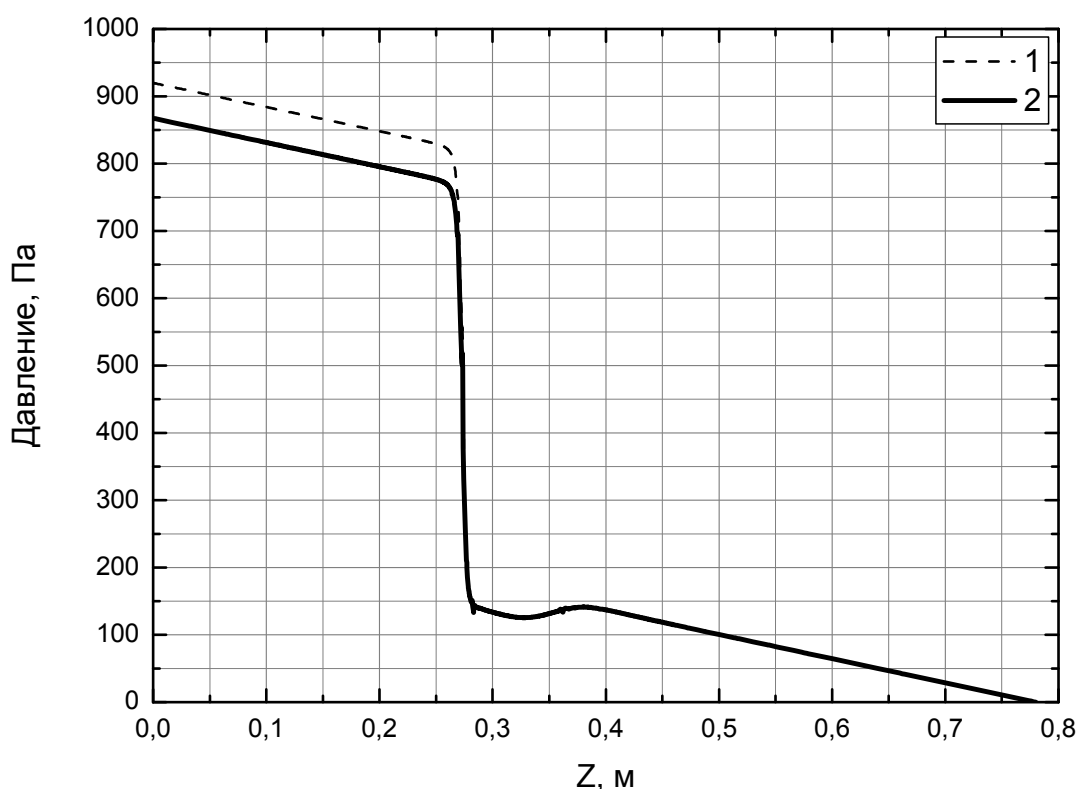


Рис. 2.18 – Распределение давления вдоль оси

1 – течение без пленки жидкости, 2 – течение с пленкой жидкости

Из Рис. 2.18 следует, что перепад давления на ПДЛ уменьшается на ~7% при наличии пленки жидкости. Таким образом, анализ модельной задачи показывает, что появление пленки жидкости на нижней поверхности ПДЛ приводит к уменьшению перепада давления.

Поэтому гидросопротивление ПДЛ в случае больших паросодержаний под ПДЛ будет меньше по сравнению с гидросопротивлением, которое оказывает ПДЛ однофазному потоку пара такого же расхода.

В заключение следует отметить, что в связи с полученными результатами по снижению гидросопротивления ПДЛ была проведена аналогичная обработка опытных данных экспериментов, выполненных на

стенде в ОКБ «Гидропресс» в 1983 году (этот стенд был конструктивно похож на стенд ПГВ) [44]. Полученные результаты подтверждают вывод о том, что в случае больших паросодержаний под ПДЛ гидросопротивление ПДЛ меньше по сравнению с гидросопротивлением, которое оказывает ПДЛ однофазному потоку пара такого же расхода. Из-за ограниченности объема описание этой работы не включено в состав диссертации. Более детально ознакомиться с этими результатами можно в [45].

## 2.3 Экспериментальное исследование выравнивающей способности ПДЛ

Были проведены эксперименты по определению выравнивающей способности ПДЛ при различной подаче пара на горячую и холодную стороны. Исследовались ПДЛ с равномерной перфорацией и ПДЛ с неравномерной перфорацией.

Были исследованы два соотношения расходов пара, подаваемых на горячую и холодную стороны, которые условно обозначим как:

1) «3:1» (5,14 – 5,36 т/ч на горячую сторону; 1,85 – 1,91 т/ч на холодную сторону);

2) «2:0» (3,93 – 4,34 т/ч на горячую сторону; 0,08 – 0,24 т/ч на холодную сторону).

### 2.3.1 Описание экспериментальных режимов с различной подачей пара на горячую и холодную стороны (отношение расходов «3:1»)

#### ПДЛ с равномерной перфорацией

На Рис. 2.19 – Рис. 2.21 показаны распределения экспериментальных параметров для ПДЛ с равномерной перфорацией при двух различных весовых уровнях над ПДЛ – 70 мм и 168 мм. Расход пара на горячей стороне 5,35 т/ч, на холодной 1,85 т/ч.

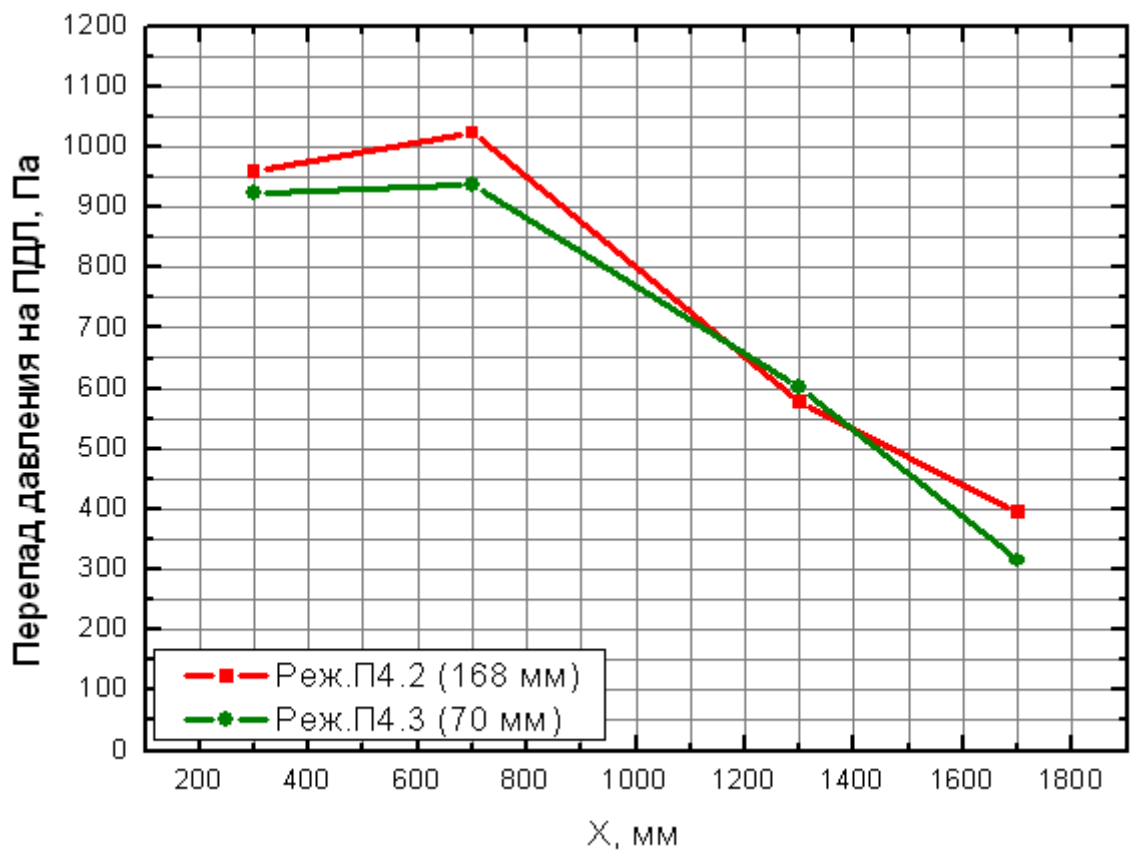


Рис. 2.19 – Распределение перепадов давления на ПДЛ вдоль его длины для ПДЛ с равномерной перфорацией

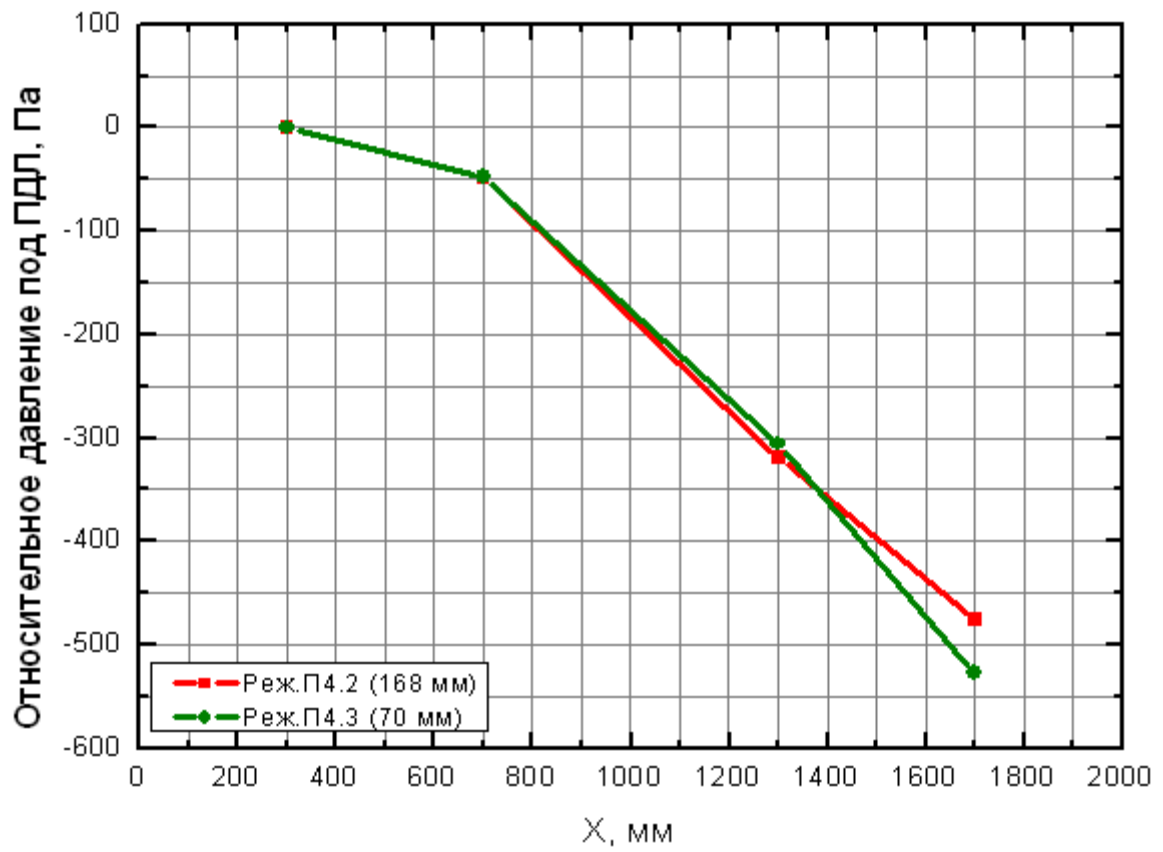


Рис. 2.20 – Относительное давление под ПДЛ для ПДЛ с равномерной перфорацией

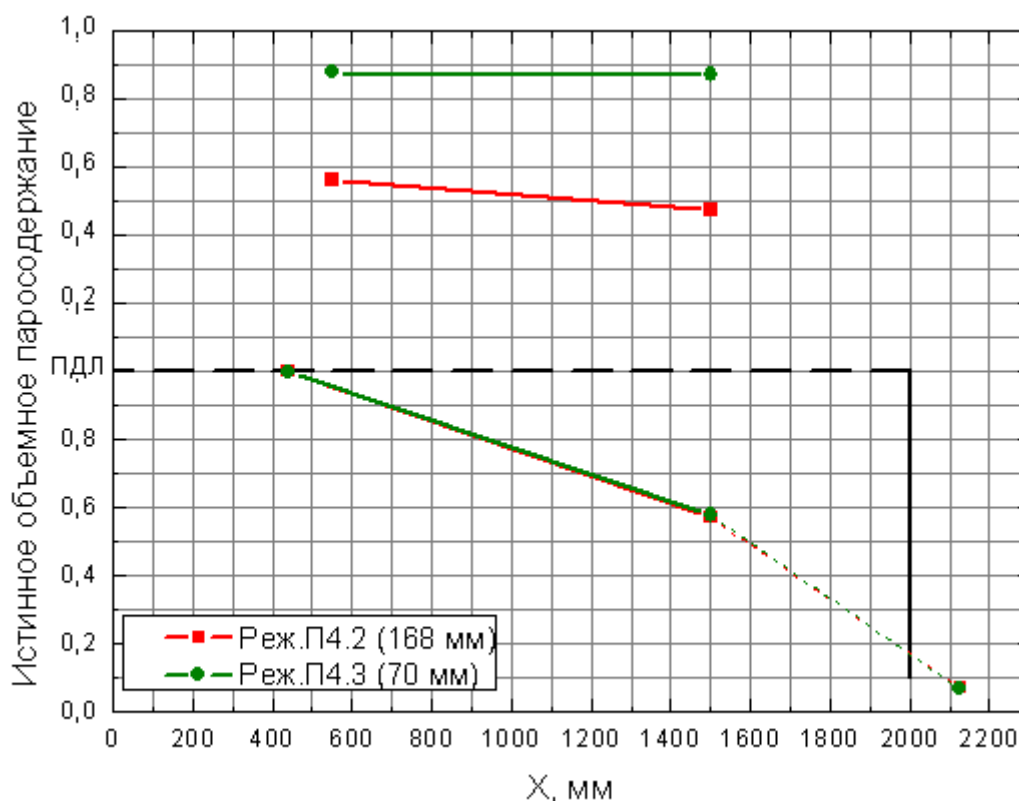


Рис. 2.21 – Распределение истинного объемного паросодержания в объеме модели

Как видно из Рис. 2.19 – Рис. 2.21, распределения параметров практически не зависят от значения весового уровня над ПДЛ. Высокое значение истинного объемного паросодержания над ПДЛ для режима П4.3 (см. Рис. 2.21) объясняется низким весовым уровнем над ПДЛ.

### ПДЛ с неравномерной перфорацией

На Рис. 2.22 – Рис. 2.24 показаны распределения экспериментальных параметров для ПДЛ с неравномерной перфорацией при различных весовых уровнях над ПДЛ – от 68 мм до 168 мм. Расход пара от режима к режиму менялся незначительно, и в среднем составлял на горячей стороне 5,25 т/ч, на холодной 1,87 т/ч.

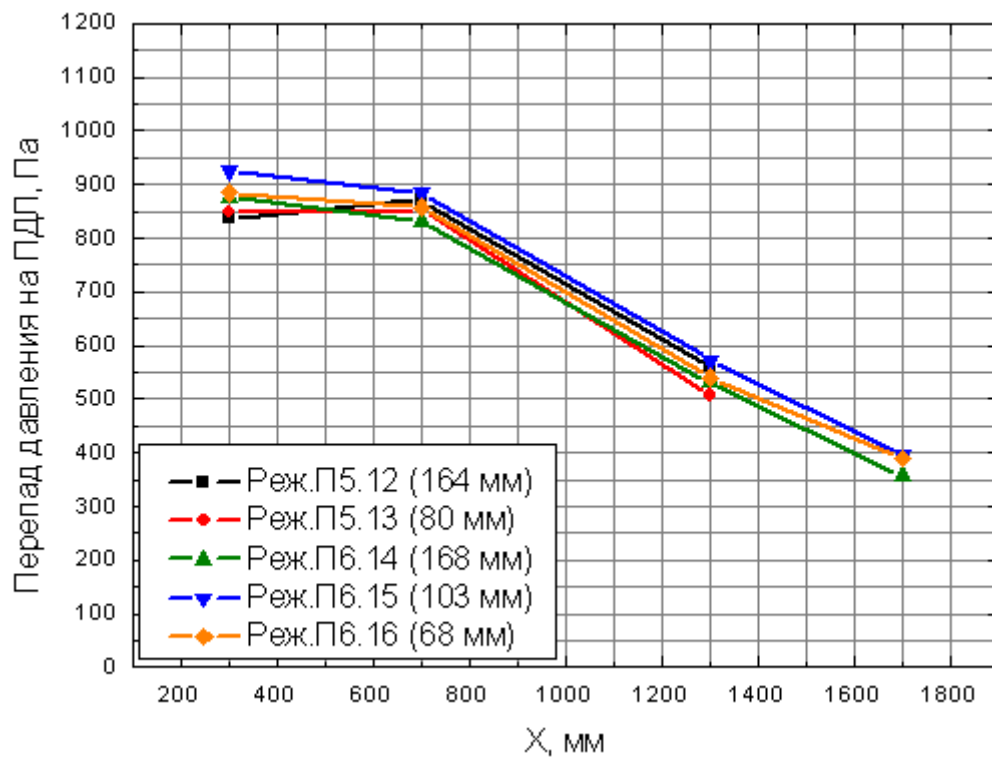


Рис. 2.22 – Распределение перепадов давления на ПДЛ вдоль его длины для ПДЛ с неравномерной перфорацией

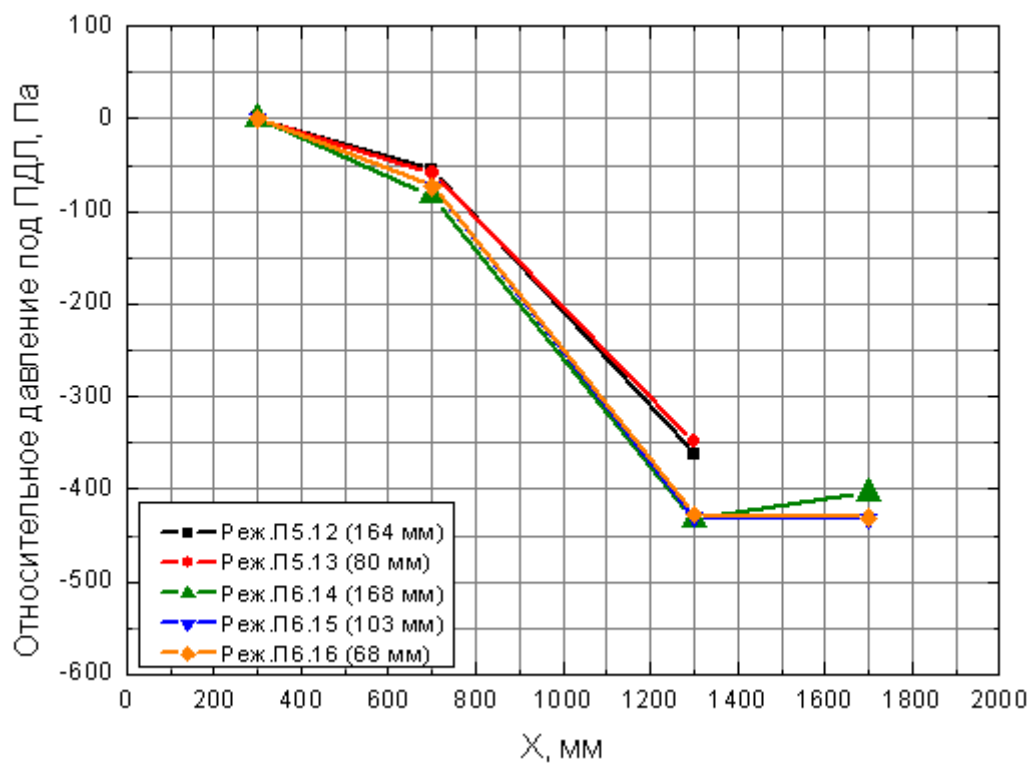


Рис. 2.23 – Относительное давление под ПДЛ для ПДЛ с неравномерной перфорацией



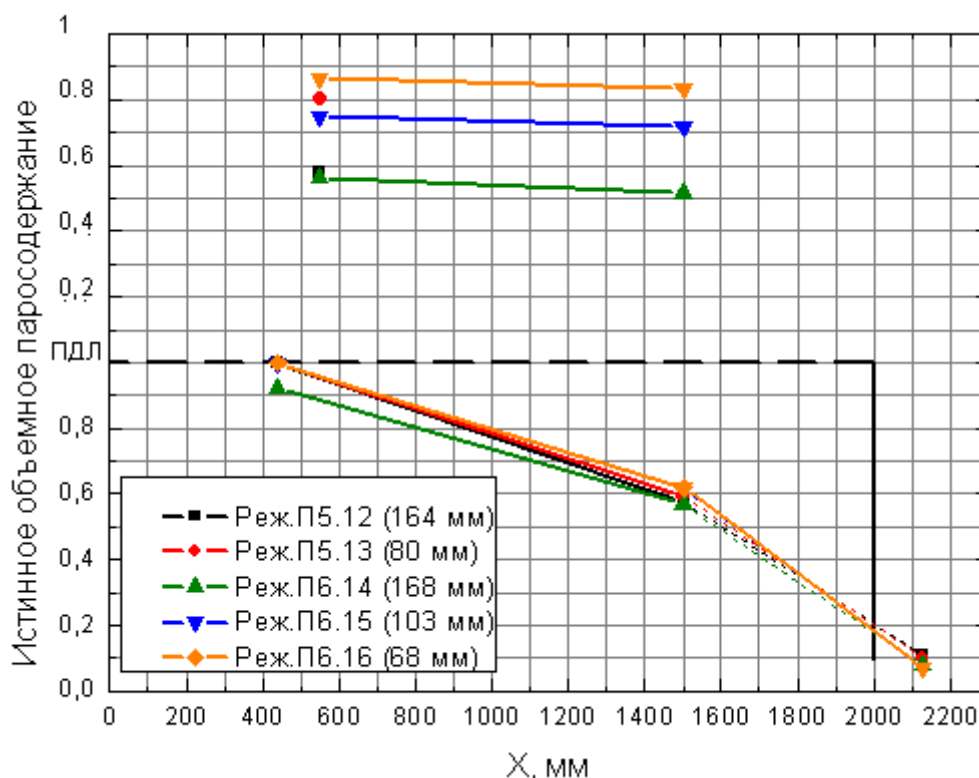


Рис. 2.24 – Распределение истинного объемного паросодержания в объеме модели для ПДЛ с неравномерной перфорацией

Как видно из Рис. 2.22 – Рис. 2.24, распределения параметров практически не зависят от значения весового уровня над ПДЛ. Высокое значение истинного объемного паросодержания над ПДЛ для режимов П5.13, П6.16 (см. Рис. 2.24) объясняется низким весовым уровнем над ПДЛ.

### 2.3.2 Описание экспериментальных режимов с подачей пара на горячую сторону (отношение расходов «2:0»)

#### ПДЛ с равномерной перфорацией

На Рис. 2.25 – Рис. 2.27 показаны распределения экспериментальных параметров для ПДЛ с равномерной перфорацией при различных весовых уровнях над ПДЛ – от 73 мм до 258 мм. Расход пара от режима к режиму

менялся незначительно, и составлял на горячей стороне 3,93 – 4,34 т/ч, на холодной 0,08 – 0,22 т/ч.

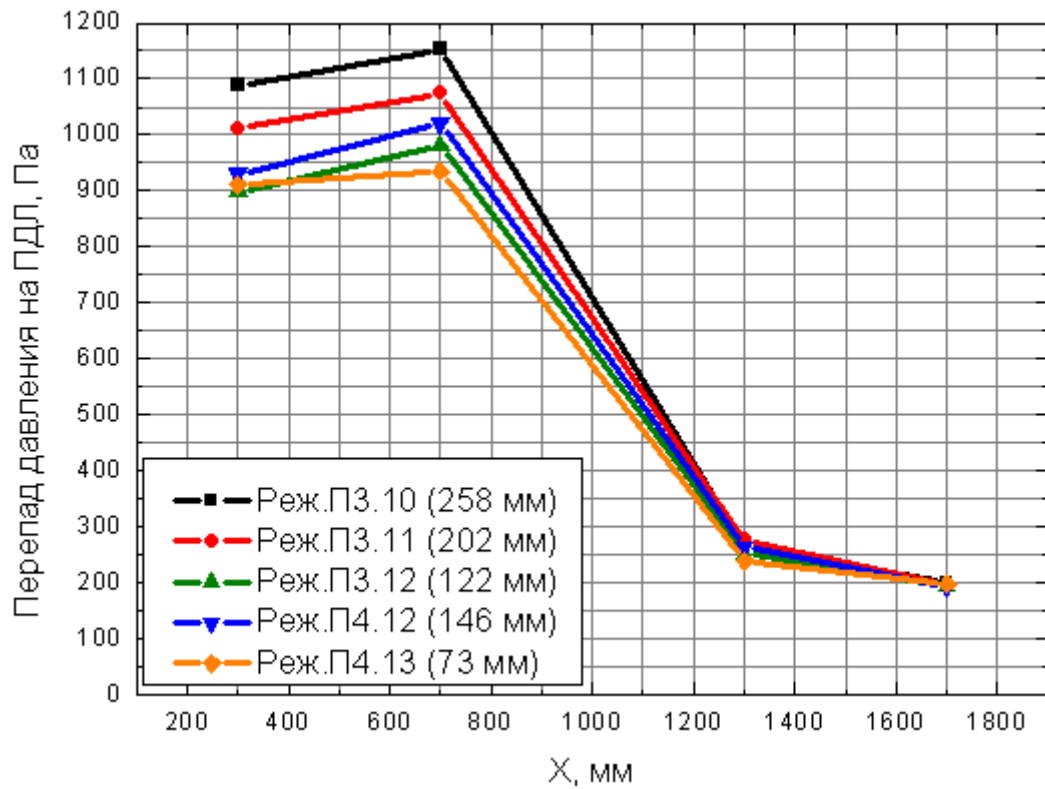


Рис. 2.25 – Распределение перепадов давления на ПДЛ вдоль его длины для ПДЛ с равномерной перфорацией

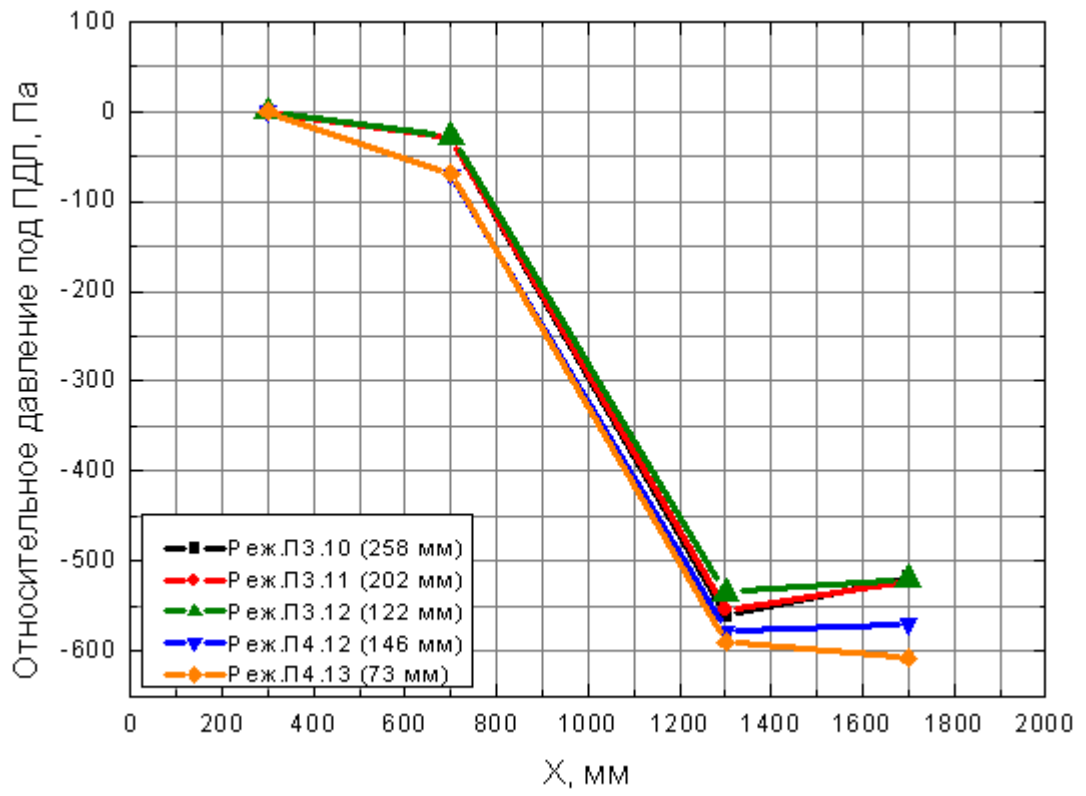


Рис. 2.26 – Относительное давление под ПДЛ для ПДЛ с равномерной перфорацией

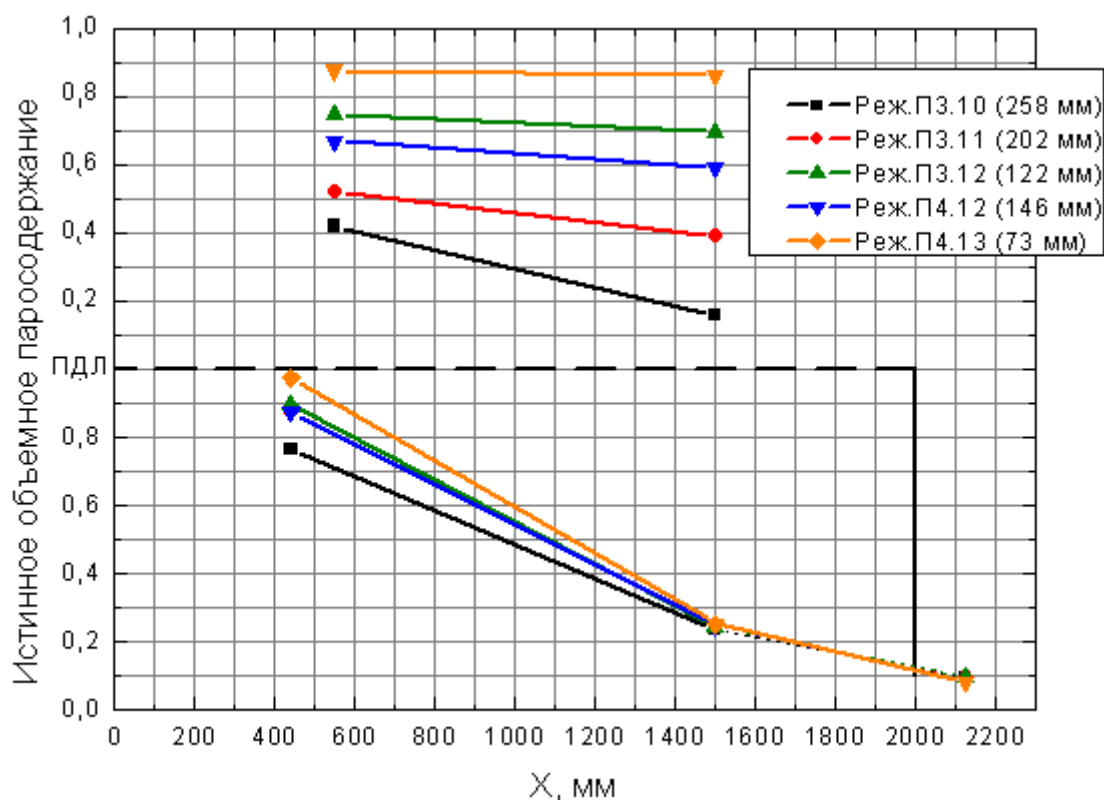


Рис. 2.27 – Распределение истинного объемного паросодержания в объеме модели

Как видно из Рис. 2.25 перепады давления на ПДЛ незначительно (в пределах 20%) различаются в зависимости от значения весового уровня над ПДЛ.

### ПДЛ с неравномерной перфорацией

На Рис. 2.28 – Рис. 2.30 показаны распределения экспериментальных параметров для ПДЛ с неравномерной перфорацией при различных весовых уровнях над ПДЛ – от 68 мм до 167 мм. Расход пара от режима к режиму менялся незначительно, и составлял на горячей стороне 4,10 – 4,24 т/ч, на холодной 0,11 – 0,22 т/ч.

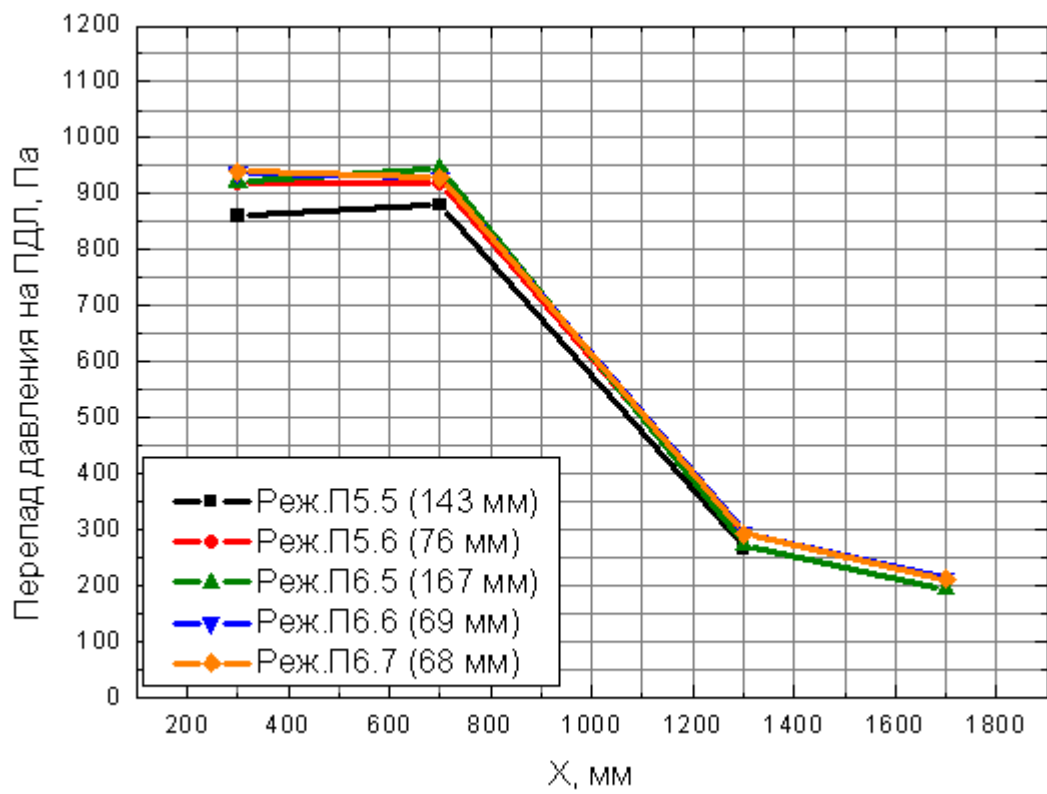


Рис. 2.28 – Распределение перепадов давления на ПДЛ вдоль его длины для ПДЛ с неравномерной перфорацией

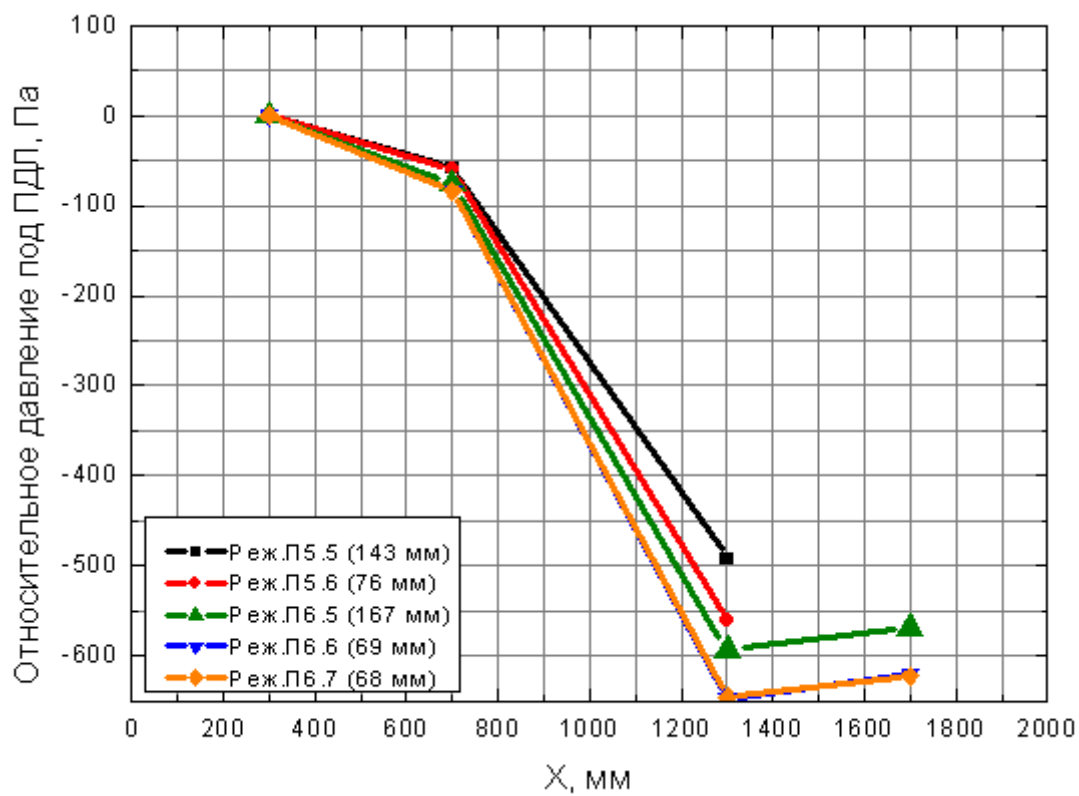


Рис. 2.29 – Относительное давление под ПДЛ для ПДЛ с неравномерной перфорацией

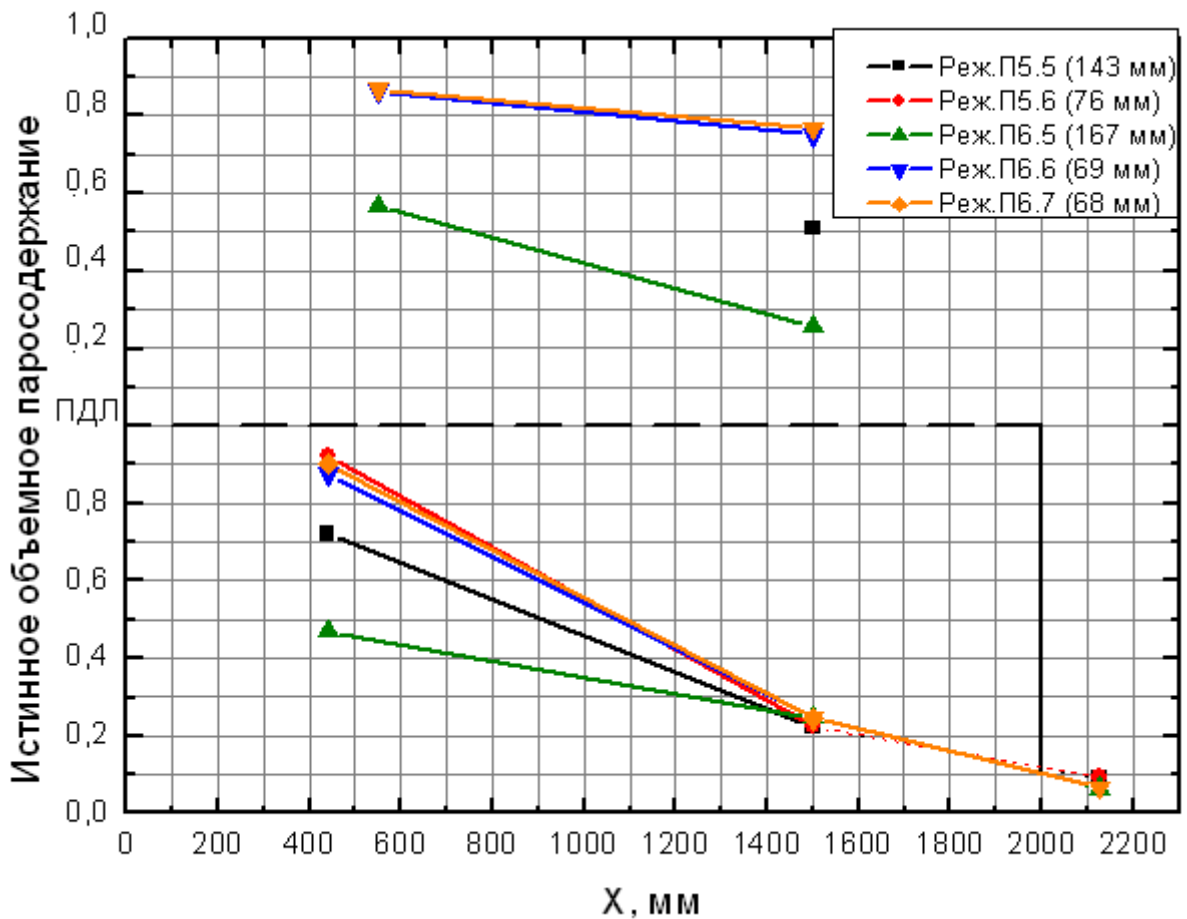


Рис. 2.30 – Распределение истинного объемного паросодержания в объеме модели для ПДЛ с неравномерной перфорацией

Как видно из Рис. 2.28 – Рис. 2.30, распределения параметров практически не зависят от значения весового уровня над ПДЛ. Высокое значение истинного объемного паросодержания над ПДЛ для режимов П6.6, П6.7 (см. Рис. 2.30) объясняется низким весовым уровнем над ПДЛ.

### 2.3.3 Анализ экспериментальных режимов с различной подачей пара на горячую и холодную стороны (отношение расходов «3:1»)

#### ПДЛ с равномерной перфорацией

На основе опытных данных, представленных на Рис. 2.19 – Рис. 2.21, выполним анализ выравнивающей способности ПДЛ с равномерной перфорацией.

Примем, что перепад давления на ПДЛ определяется формулой (2.2), которая имеет следующий вид:

$$\Delta P_{\text{ПДЛ}} = \xi \cdot \frac{\rho'' (w''_{\text{отв}})^2}{2} \cdot \Psi \quad (2.13)$$

Выразим перепад давления на ПДЛ через расход пара:

$$\Delta P_{\text{ПДЛ}} = \xi \cdot \frac{G^2}{2\rho'' S_{\text{отв}}^2} \cdot \Psi \quad (2.14)$$

Определим из формулы (2.14) расход пара:

$$G = \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{ПДЛ}} \rho'' S_{\text{отв}}^2}{\xi \Psi}} \quad (2.15)$$

Определим отношение расходов пара через горячую и холодную стороны ПДЛ:

$$G_{\text{гор}} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{ПДЛ\_гор}} \rho'' S_{\text{отв\_гор}}^2}{\xi_{\text{гор}} \Psi_{\text{гор}}}} \quad (2.16)$$

$$G_{\text{хол}} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{ПДЛ\_хол}} \rho'' S_{\text{отв\_хол}}^2}{\xi_{\text{хол}} \Psi_{\text{хол}}}} \quad (2.17)$$



$$\frac{G_{\text{гор}}}{G_{\text{хол}}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{ПДЛ\_гор}} S_{\text{отв\_гор}}^2 \xi_{\text{хол}} \Psi_{\text{хол}}}{\Delta P_{\text{ПДЛ\_хол}} S_{\text{отв\_хол}}^2 \xi_{\text{гор}} \Psi_{\text{гор}}}} \quad (2.18)$$

$$\frac{S_{\text{отв\_гор}}}{S_{\text{отв\_хол}}} = 1 \quad (2.19)$$

$$\frac{\xi_{\text{хол}}}{\xi_{\text{гор}}} = 1 \quad (2.20)$$

В итоге, получим:

$$\frac{G_{\text{гор}}}{G_{\text{хол}}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{ПДЛ\_гор}} \Psi_{\text{хол}}}{\Delta P_{\text{ПДЛ\_хол}} \Psi_{\text{гор}}}} \quad (2.21)$$

Примем, что:

$$\Delta P_{\text{ПДЛ\_гор}} = \frac{(\text{RA01DP01} + \text{RA01DP02})}{2} - \Delta P_{\text{гидростат\_гор}} \quad (2.22)$$

$$\Delta P_{\text{ПДЛ\_хол}} = \frac{(\text{RA01DP03} + \text{RA01DP04})}{2} - \Delta P_{\text{гидростат\_хол}} \quad (2.23)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{гидростат\_гор}} &= \rho'(1 - \bar{\varphi}_{\text{над ПДЛ\_гор}})gh + \rho''\bar{\varphi}_{\text{над ПДЛ\_гор}}gh \\ &+ \rho'(1 - \bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ\_гор}})gh + \rho''\bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ\_гор}}gh \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{гидростат\_хол}} &= \rho'(1 - \bar{\varphi}_{\text{над ПДЛ\_хол}})gh + \rho''\bar{\varphi}_{\text{над ПДЛ\_хол}}gh \\ &+ \rho'(1 - \bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ\_хол}})gh + \rho''\bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ\_хол}}gh \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}_{\text{гор}}} = \text{RA01V01} \quad (2.26)$$

$$\bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}_{\text{хол}}} = \text{RA01V02} \quad (2.27)$$

$$\bar{\varphi}_{\text{над ПДЛ}_{\text{гор}}} = \text{RA01V03} \quad (2.28)$$

$$\bar{\varphi}_{\text{над ПДЛ}_{\text{хол}}} = \text{RA01V04} \quad (2.29)$$

В п. 2.2.2 диссертации была определена поправка на двухфазность потока при определении гидравлического сопротивления ПДЛ. Далее будем использовать поправку на двухфазность потока, полученную для случая определения коэффициента сопротивления ПДЛ однофазному потоку по [38] без учета числа Рейнольдса. Она имеет следующий вид:

$$\Psi = 1,64 - 1,18 \cdot \bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}} \quad (2.30)$$

$$\frac{\Psi_{\text{хол}}}{\Psi_{\text{гор}}} = \frac{1,64 - 1,18 \cdot \bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}_{\text{хол}}}}{1,64 - 1,18 \cdot \bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}_{\text{гор}}}} \quad (2.31)$$

По найденному отношениям  $\Delta P_{\text{ПДЛ}_{\text{гор}}}/\Delta P_{\text{ПДЛ}_{\text{хол}}}$  и  $\Psi_{\text{хол}}/\Psi_{\text{гор}}$ , а также общему расходу пара определяются расходы пара через горячую и холодную стороны ПДЛ  $G_{\text{гор}}$  и  $G_{\text{хол}}$ .

Для характеристики выравнивающей способности ПДЛ введем коэффициент выравнивания ПДЛ, который определим следующим образом.

$$k_{\text{ПДЛ}} = 1 - \frac{G_{\text{гор}} - G_{\text{хол}}}{\text{RT01F02} - \text{RT01F03}} \quad (2.32)$$

Он характеризует отношение разности расходов пара на горячей и холодной сторонах ПДЛ к начальной разности расходов пара и показывает степень выравнивания первоначального неравномерного потока пара. Значение  $k_{\text{ПДЛ}} = 1$  соответствует полному выравниванию, то есть расход пара на горячей

стороне ПДЛ равен расходу пара на холодной стороне ПДЛ. Другое предельное значение  $k_{\text{ПДЛ}} = 0$  означает отсутствие выравнивающей способности ПДЛ.

Если  $0 < k_{\text{ПДЛ}} < 1$ , то полного выравнивания не происходит – расход через холодную половину ПДЛ остается меньше расхода через горячую половину.

Если  $k_{\text{ПДЛ}} > 1$ , то расход через холодную половину ПДЛ становится больше расхода через горячую половину.

В Табл. 2.9 приведены рассчитанные по формулам выше характеристики выравнивания расхода пара на ПДЛ с равномерной перфорацией. Даны результаты обработки только режима П4.2, поскольку в режиме П4.3 весовой уровень над ПДЛ небольшой, поэтому измерения объемного паросодержания над ПДЛ RA01V03 и RA01V04 дают неверные значения.

Табл. 2.9 – Характеристики выравнивания расхода пара на ПДЛ с равномерной перфорацией

Номер режима	Расход пара на входе в СВД (гор.сторона), (RT01F02), т/ч	Расход пара на входе в СВД (хол. сторона), (RT01F03), т/ч	Суммарный расход пара на входе в СВД, (RT01F02+RT01F03), т/ч	RA01V01	RA01V02	RA01V03	RA01V04	$\Delta P_{\text{гидростат\_гор}}$ , Па	$\Delta P_{\text{гидростат\_хол}}$ , Па	RA01DP01, Па	RA01DP02, Па	RA01DP03, Па	RA01DP04, Па	$\Delta P_{\text{ПДЛ\_гор}}$ , Па	$\Delta P_{\text{ПДЛ\_хол}}$ , Па	$\Psi_{\text{хол}}/\Psi_{\text{гор}}$	$G_{\text{гор}}/G_{\text{хол}}$	$G_{\text{гор}}$ , т/ч	$G_{\text{хол}}$ , т/ч	$k_{\text{ПДЛ}}$
П4.2	5,36	1,85	7,21	1,000	0,570	0,563	0,474	37,3	73,6	960	1024	577	395	954,7	412,4	2,1	2,20	4,96	2,25	0,23

Из Табл. 2.9 следует, что в результате выравнивающего действия ПДЛ с равномерной перфорацией в режиме П4.2 часть расхода пара (~0,4 т/ч), подаваемого на горячую сторону модели перетекает на холодную сторону, при этом  $k_{\text{ПДЛ}} = 0,23$ . Таким образом, ПДЛ с равномерной перфорацией 5,7% не обеспечивает полного выравнивания расхода пара.

### ПДЛ с неравномерной перфорацией

На основе опытных данных, представленных на Рис. 2.22 – Рис. 2.24, выполним анализ выравнивающей способности ПДЛ с неравномерной перфорацией.

В соответствии с формулой (2.18), имеем:

$$\frac{G_{\text{гор}}}{G_{\text{хол}}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{ПДЛ\_гор}} S_{\text{отв\_гор}}^2 \xi_{\text{хол}} \Psi_{\text{хол}}}{\Delta P_{\text{ПДЛ\_хол}} S_{\text{отв\_хол}}^2 \xi_{\text{гор}} \Psi_{\text{гор}}}} \quad (2.33)$$

$$\frac{S_{\text{отв\_гор}}}{S_{\text{отв\_хол}}} = 0,494 \quad (2.34)$$

Определим согласно [38] при  $Re > 10^5$  коэффициент сопротивления ПДЛ со степенью перфорации 4,1%  $\xi_{\text{гор}} = 2,367$ , а для ПДЛ со степенью перфорации 8,3%  $\xi_{\text{хол}} = 2,21$ . Тогда:

$$\frac{\xi_{\text{хол}}}{\xi_{\text{гор}}} = \frac{2,21}{2,367} = 0,934 \quad (2.35)$$

Таким образом, формула (2.33) упростится до:

$$\frac{G_{\text{гор}}}{G_{\text{хол}}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{ПДЛ\_гор}} \Psi_{\text{хол}} S_{\text{отв\_гор}}^2 \xi_{\text{хол}}}{\Delta P_{\text{ПДЛ\_хол}} \Psi_{\text{гор}} S_{\text{отв\_хол}}^2 \xi_{\text{гор}}}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{ПДЛ\_гор}} \Psi_{\text{хол}}}{\Delta P_{\text{ПДЛ\_хол}} \Psi_{\text{гор}}} 0,494^2 \cdot 0,934} =$$

$$= 0,477 \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{ПДЛ\_гор}} \Psi_{\text{хол}}}{\Delta P_{\text{ПДЛ\_хол}} \Psi_{\text{гор}}}} \quad (2.36)$$

Отношение поправок на двухфазность потока при определении гидравлического сопротивления ПДЛ ( $\Psi_{\text{хол}}/\Psi_{\text{гор}}$ ) и вычисление значений  $\Delta P_{\text{ПДЛ\_гор}}/\Delta P_{\text{ПДЛ\_хол}}$  вычисляем так же, как описано выше в настоящей диссертации. Примем, что зависимости  $\Psi_{\text{хол}}(\varphi)$  (живое сечение 4,1%) и  $\Psi_{\text{гор}}(\varphi)$  (живое сечение 8,3%) имеют такой же вид, что и для ПДЛ с живым сечением 5,7%.

В Табл. 2.10 приведены рассчитанные характеристики выравнивания расхода пара на ПДЛ с неравномерной перфорацией.

Табл. 2.10 – Характеристики выравнивания расхода пара на ПДЛ с неравномерной перфорацией

Номер режима	Расход пара на входе в СВД (гор.сторона), (RT01F02), т/ч	Расход пара на входе в СВД (хол. сторона), (RT01F03), т/ч	Суммарный расход пара на входе в СВД, (RT01F02+RT01F03), т/ч	RA01V01	RA01V02	RA01V03	RA01V04	$\Delta P_{\text{гидростат\_гор}}$ , Па	$\Delta P_{\text{гидростат\_хол}}$ , Па	RA01DP01, Па	RA01DP02, Па	RA01DP03, Па	RA01DP04, Па	$\Delta P_{\text{ПДЛ\_гор}}$ , Па	$\Delta P_{\text{ПДЛ\_хол}}$ , Па	$\Psi_{\text{хол}}/\Psi_{\text{гор}}$	$G_{\text{гор}}/G_{\text{хол}}$	$G_{\text{гор}}$ , т/ч	$G_{\text{хол}}$ , т/ч	$k_{\text{ПДЛ}}$
П5.12	5,15	1,91	7,06	1,000	0,575	0,579	-*	36	66	838	871	560	-**	819	494	2,09	0,89	3,33	3,73	1,13
П5.13	5,14	1,90	7,04	1,000	0,594	0,804	-*	21	49	848	854	507	-**	830	458	2,04	0,92	3,37	3,67	1,09
П6.14	5,43	1,89	7,32	0,920	0,567	0,563	0,517	43	67	877	831	531	356	811	377	2,11	1,02	3,72	3,60	0,97
П6.15	5,31	1,83	7,14	1,000	0,618	0,749	0,72	24	51	925	885	572	397	881	434	1,98	0,96	3,50	3,64	1,04
П6.16	5,30	1,82	7,12	1,000	0,62	0,866	0,835	16	43	885	857	540	390	855	422	1,98	0,96	3,49	3,63	1,04

\* - датчик RA01V04 в данном режиме не работал. В расчетах в качестве значений RA01V04 принимались показания датчика RA01V03.

\*\* - датчик RA01DP04 в данном режиме не работал. В расчетах в качестве значений RA01DP04 принимались показания датчика RA01DP03.

Из Табл. 2.10 следует, что при начальной степени неравномерности подачи пара 3:1 в результате выравнивающего действия ПДЛ с неравномерной перфорацией значительная часть расхода пара ( $\sim 1,8$  т/ч), подаваемого на горячую сторону модели перетекает на холодную сторону, при этом  $k_{\text{ПДЛ}} \approx 1$ . Использование неравномерной перфорации ПДЛ (4,1% / 8,3%) значительно увеличивает количество пара, перетекающего с горячей на холодную сторону, по сравнению с равномерной перфорацией ПДЛ (5,7%), где расчет по аналогичной методике дал  $\sim 0,4$  т/ч и  $k_{\text{ПДЛ}} = 0,23$ .

#### 2.3.4 Анализ экспериментальных режимов с подачей пара на горячую сторону (отношение расходов «2:0»)

##### ПДЛ с равномерной перфорацией

На основе опытных данных, представленных на Рис. 2.25 – Рис. 2.27, выполним анализ выравнивающей способности ПДЛ с равномерной перфорацией.

По методике, изложенной выше, оценим выравнивающую способность ПДЛ на основе опытных данных по перепаду давления на ПДЛ. Результаты приведены в Табл. 2.11.



Табл. 2.11 – Характеристики выравнивания расхода пара на ПДЛ с равномерной перфорацией

Номер режима	Расход пара на входе в СВД (гор. сторона), (RT01F02), т/ч	Расход пара на входе в СВД (хол. сторона), (RT01F03), т/ч	Суммарный расход пара на входе в СВД, (RT01F02+RT01F03), т/ч	RA01V01	RA01V02	RA01V03	RA01V04	$\Delta P_{\text{гидростат\_гор}}$ , Па	$\Delta P_{\text{гидростат\_хол}}$ , Па	RA01DP01, Па	RA01DP02, Па	RA01DP03, Па	RA01DP04, Па	$\Delta P_{\text{ПДЛ\_гор}}$ , Па	$\Delta P_{\text{ПДЛ\_хол}}$ , Па	$\Psi_{\text{хол}}/\Psi_{\text{гор}}$	$G_{\text{гор}}/G_{\text{хол}}$	$G_{\text{гор}}$ , т/ч	$G_{\text{хол}}$ , т/ч	$k_{\text{ПДЛ}}$
ПЗ.10	3,95	0,22	4,17	0,766	0,236	0,423	0,158	63	118	1089	1154	265	200	1059	115	1,85	4,13	3,36	0,81	0,32
ПЗ.11	3,93	0,21	4,14	0,874	0,248	0,524	0,39	49	101	1011	1074	276	195	994	135	2,2	4,02	3,32	0,82	0,33
ПЗ.12	3,93	0,21	4,14	0,897	0,246	0,75	0,698	32	80	898	981	252	194	908	143	2,3	3,82	3,28	0,86	0,35
П4.12	4,20	0,08	4,28	0,875	0,249	0,672	0,593	38	87	931	1020	264	193	938	142	2,2	3,81	3,39	0,89	0,39
П4.13	4,34	0,11	4,45	0,975	0,252	0,879	0,865	17	68	912	934	239	197	906	150	2,74	4,07	3,57	0,88	0,36

Из Табл. 2.11 следует, что в результате выравнивающего действия ПДЛ с равномерной перфорацией в режимах «2:0» часть расхода пара ( $\sim 0,6 - 0,8$  т/ч), подаваемого на горячую сторону модели перетекает на холодную сторону, при этом  $k_{\text{ПДЛ}} = 0,32 - 0,39$ . Полученные значения коэффициента выравнивания достаточно близки к значениям для режимов «3:1»  $k_{\text{ПДЛ}} = 0,22$ .

#### ПДЛ с неравномерной перфорацией

По методике, изложенной выше, оценим выравнивающую способность ПДЛ на основе опытных данных по перепаду давления на ПДЛ. Результаты приведены в Табл. 2.12.

Табл. 2.12 – Характеристики выравнивания расхода пара на ПДЛ с неравномерной перфорацией

Номер режима	Расход пара на входе в СВД (гор. сторона), (RT01F02), т/ч	Расход пара на входе в СВД (хол. сторона), (RT01F03), т/ч	Суммарный расход пара на входе в СВД, (RT01F02+RT01F03), т/ч	RA01V01	RA01V02	RA01V03	RA01V04	$\Delta P_{\text{гидростат\_гор}}$ , Па	$\Delta P_{\text{гидростат\_хол}}$ , Па	RA01DP01, Па	RA01DP02, Па	RA01DP03, Па	RA01DP04, Па	$\Delta P_{\text{ПДЛ\_гор}}$ , Па	$\Delta P_{\text{ПДЛ\_хол}}$ , Па	$\Psi_{\text{хол}}/\Psi_{\text{гор}}$	$G_{\text{гор}}/G_{\text{хол}}$	$G_{\text{гор}}$ , т/ч	$G_{\text{хол}}$ , т/ч	$k_{\text{ПДЛ}}$
П5.5	4,10	0,14	4,24	0,721	0,223	0,08	0,08	90	124	861	881	267	-	781	143	1,75	1,47	2,52	1,72	0,80
П5.6	4,14	0,11	4,25	0,923	0,223	0,511	-	46	94	919	919	290	-	873	185	2,50	1,64	2,64	1,61	0,74
П6.5	4,19	0,24	4,43	0,470	0,247	0,567	0,256	74	110	922	945	274	194	860	124	1,24	1,40	2,58	1,85	0,81
П6.6	4,24	0,24	4,48	0,876	0,248	0,864	0,751	25	76	938	929	295	213	909	178	2,22	1,61	2,76	1,72	0,74
П6.7	4,24	0,23	4,47	0,904	0,246	0,869	0,767	23	75	940	929	293	212	912	178	2,35	1,66	2,79	1,68	0,72

Из Табл. 2.12 следует, что в результате выравнивающего действия ПДЛ с неравномерной перфорацией в режимах «2:0» часть расхода пара (1,5 – 1,6 т/ч), подаваемого на горячую сторону модели перетекает на холодную сторону, при этом  $k_{\text{ПДЛ}} = 0,72 - 0,81$ . Ранее для режимов «3:1» по такой же методике были получены немного более высокие значения коэффициентов выравнивания  $k_{\text{ПДЛ}} \approx 1$ .

### 2.3.5 Анализ полученных результатов по оценке выравнивающей способности ПДЛ

Сведем полученные выше результаты по оценке выравнивающей способности ПДЛ в Табл. 2.13.

Табл. 2.13 – Таблица выравнивающей способности ПДЛ

Режим	ПДЛ	$k_{\text{ПДЛ}}$
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

Из Табл. 2.13 следует, что применение погруженного дырчатого листа с неравномерной перфорацией существенно улучшает его выравнивающую способность по сравнению с применением листа с равномерной перфорацией (значение  $k_{\text{ПДЛ}}$  увеличивается для режима подачи пара «3:1» в 5 раз, для режима подачи пара «2:0» – в 2 раза).

Следует отметить, что величина весового уровня над ПДЛ практически не влияет на выравнивающую способность ПДЛ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Выполнены экспериментальные исследования гидросопротивления и выравнивающей способности ПДЛ с равномерной и неравномерной перфорацией на стенде ПГВ (ЭНИЦ).

2. Приведено подробное описание экспериментального стенда ПГВ. Представлены схема стенда, конструкция модели парогенератора, система измерений и методика обработки опытных данных. Описана методика проведения испытаний.

3. Даны описания экспериментальных режимов 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.

Установлена зависимость коэффициента  $\Psi$ , характеризующего поправку на двухфазность потока, от объемного паросодержания под ПДЛ.

Следует отметить, что полученные в настоящем экспериментальном исследовании значения коэффициента сопротивления заметно меньше, чем обычно используемые в расчетах.

4. Представлены описания экспериментальных режимов 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»). Были исследованы два соотношения расходов пара, подаваемых на горячую и холодную стороны («3:1» и «2:0»).

Выполнена оценка выравнивающей способности ПДЛ на основе опытных данных. 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  $k_{\text{ПДЛ}}$  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»  $k_{\text{ПДЛ}} \approx 0,75$ .

## ГЛАВА 3 ВАЛИДАЦИЯ РАСЧЕТНОГО КОДА STEG НА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ НА СТЕНДЕ ПГВ

### 3.1 Описание кода STEG

Код STEG [48–51] был разработан в Электрогорском научно-исследовательском центре по безопасности атомных станций (ЭНИЦ) и основан на двухскоростном двухтемпературном трехмерном описании движения пароводяной смеси [52], при этом для анализа межфазного взаимодействия используется карта режимов течения двухфазного потока. Численное интегрирование определяющих уравнений осуществляется с помощью полунейвной численной схемы [53]. Основная область применения кода STEG – трехмерное численное моделирование течения пароводяной смеси во втором контуре горизонтального парогенератора АЭС с ВВЭР [54–57].

#### 3.1.1 Математическая модель кода STEG

Математическая модель, разработанная для кода STEG, основана на нестационарных трехмерных уравнениях механики двухфазных сред.

##### Уравнения сохранения массы, импульса, энергии

Для воды (фаза 1) и пара (фаза 2) формулируются законы сохранения массы, количества движения и энергии, которые дополняются замыкающими соотношениями, описывающими межфазное взаимодействие.

##### Уравнения сохранения массы фаз

вода



$$\frac{\partial \alpha_1 \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_1 \rho_1 u_1}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_1 \rho_1 v_1}{\partial y} + \frac{\partial \alpha_1 \rho_1 w_1}{\partial z} = -\Gamma + M_{1s} \quad (3.1)$$

пар

$$\frac{\partial \alpha_2 \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_2 \rho_2 u_2}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_2 \rho_2 v_2}{\partial y} + \frac{\partial \alpha_2 \rho_2 w_2}{\partial z} = \Gamma + M_{2s}, \quad (3.2)$$

где  $x, y, z$  – координаты направления потока,  $t$  – время,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – объемные доли жидкой и газовой фаз, соответственно,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность жидкой и газовой фаз,  $u$  – скорость потока в направлении  $x$ ,  $v$  – скорость потока в направлении  $y$ ,  $w$  – скорость потока в направлении  $z$ ,  $\Gamma$  – величина межфазной массопередачи,  $M_{1s}$ ,  $M_{2s}$  – объемные источники воды и пара, соответственно.

В коде STEG уравнение сохранения импульса используется в форме уравнения для скоростей фаз (уравнение движения), потому что такой подход существенно упрощает алгоритм численного решения уравнений.

### Уравнения движения фаз

Вода

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} + w_1 \frac{\partial u_1}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\Gamma^-(u_2 - u_1)}{\alpha_1 \rho_1} + \frac{C_{12}}{\alpha_1 \rho_1} |\bar{u}_2 - \bar{u}_1| (u_2 - u_1) \\ - \frac{C_{13}}{\alpha_1 \rho_1} |\bar{u}_1| u_1 \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} + w_1 \frac{\partial v_1}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\Gamma^-(v_2 - v_1)}{\alpha_1 \rho_1} + \frac{C_{12}}{\alpha_1 \rho_1} |\bar{u}_2 - \bar{u}_1| (v_2 - v_1) \\ - \frac{C_{13}}{\alpha_1 \rho_1} |\bar{u}_1| v_1 \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial w_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial w_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial w_1}{\partial y} + w_1 \frac{\partial w_1}{\partial z} \\
&= -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\Gamma^-(w_2 - w_1)}{\alpha_1 \rho_1} + \frac{C_{12}}{\alpha_1 \rho_1} |\bar{u}_2 - \bar{u}_1| (w_2 - w_1) \\
& \quad - \frac{C_{13}}{\alpha_1 \rho_1} |\bar{u}_1| w_1 - g + \frac{M_{1s}(w_{1s} - w_1)}{\alpha_1 \rho_1}
\end{aligned} \tag{3.5}$$

пар

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} + w_2 \frac{\partial u_2}{\partial z} \\
&= -\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\Gamma^+(u_1 - u_2)}{\alpha_2 \rho_2} - \frac{C_{12}}{\alpha_2 \rho_2} |\bar{u}_2 - \bar{u}_1| (u_2 - u_1) \\
& \quad - \frac{C_{23}}{\alpha_2 \rho_2^0} |\bar{u}_2| u_2
\end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial v_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} + w_2 \frac{\partial v_2}{\partial z} \\
&= -\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\Gamma^+(v_1 - v_2)}{\alpha_2 \rho_2} - \frac{C_{12}}{\alpha_2 \rho_2} |\bar{u}_2 - \bar{u}_1| (v_2 - v_1) \\
& \quad - \frac{C_{23}}{\alpha_2 \rho_2} |\bar{u}_2| v_2
\end{aligned} \tag{3.7}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial w_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial w_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial w_2}{\partial y} + w_2 \frac{\partial w_2}{\partial z} \\
&= -\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\Gamma^+(w_1 - w_2)}{\alpha_2 \rho_2} - \frac{C_{12}}{\alpha_2 \rho_2} |\bar{u}_2 - \bar{u}_1| (w_2 - w_1) \\
& \quad - \frac{C_{23}}{\alpha_2 \rho_2} |\bar{u}_2| w_2 - g + \frac{M_{2s}(w_{2s} - w_2)}{\alpha_2 \rho_2}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

где  $p$  – давление,  $C_{12}$  – коэффициент межфазного сопротивления,  $C_{13}$ ,  $C_{23}$  – коэффициенты сопротивления воды и пара о внешнюю поверхность.  $w_{1s}$ ,  $w_{2s}$  – скорости воды и пара, подаваемых из источника,  $g$  – ускорение силы тяжести.

Под внешней поверхностью подразумевается или 1) поверхность внутренних стенок трубы, в которой течет пароводяная смесь, или 2) поверхность внешних стенок трубчатки парогенератора либо других внутренних конструкций в моделируемом трехмерном объеме.

В уравнения (3.7), (3.8) входят интенсивности межфазного массообмена  $\Gamma^+$ ,  $\Gamma^-$  (конденсация/испарение):

$$\Gamma^+ = \begin{cases} \Gamma, & \text{если } \Gamma > 0 \\ 0, & \text{если } \Gamma < 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\Gamma^- = \begin{cases} 0, & \text{если } \Gamma > 0 \\ \Gamma, & \text{если } \Gamma < 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

### Уравнения сохранения энергии фаз

Уравнения сохранения энергии фаз формулируются для энтальпий фаз также с целью упрощения численной схемы решения уравнений.

вода

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_1 \rho_1 i_1}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_1 \rho_1 i_1 u_1)}{\partial x} + \frac{\partial (\alpha_1 \rho_1 i_1 v_1)}{\partial y} + \frac{\partial (\alpha_1 \rho_1 i_1 w_1)}{\partial z} \\ = \alpha_1 \frac{dP_0}{dt} + q_{i1} - \Gamma i_{1sat} + q_{31} + M_{1s} H_{1s} \end{aligned} \quad (3.11)$$

пар

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_2 \rho_2 i_2}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_2 \rho_2 i_2 u_2)}{\partial x} + \frac{\partial (\alpha_2 \rho_2 i_2 v_2)}{\partial y} + \frac{\partial (\alpha_2 \rho_2 i_2 w_2)}{\partial z} \\ = \alpha_2 \frac{dP_0}{dt} + q_{i2} + \Gamma i_{2sat} + q_{32} + M_{2s} H_{2s}, \end{aligned} \quad (3.12)$$

где  $P_0$  – среднее давление в системе,  $q_{i1}$ ,  $q_{i2}$  – тепловые потоки с межфазной поверхности к воде и к пару, соответственно,  $q_{31}$ ,  $q_{32}$  – тепловые потоки с

внешней поверхности к воде и к пару, соответственно,  $H_{1s}$ ,  $H_{2s}$  – энтальпии воды и пара, подаваемых из источника,  $i_1$ ,  $i_2$ , – удельные энтальпии воды и пара, соответственно,  $i_{1sat}$ ,  $i_{2sat}$  – удельные энтальпии воды и пара на линии насыщения.

В уравнениях (3.11), (3.12) интенсивность межфазного перехода определяется тепловыми потоками на межфазную поверхность со стороны воды и со стороны пара.

$$\Gamma = \frac{-(q_{i1} + q_{i2})}{i_{2sat} - i_{1sat}} \quad (3.13)$$

Тепловые потоки с межфазной поверхности определяются следующими выражениями:

$$q_{i1} = R_{i1}(T_{sat} - T_1) \quad (3.14)$$

$$q_{i2} = R_{i2}(T_{sat} - T_2), \quad (3.15)$$

где  $R_{i1}$ ,  $R_{i2}$  – коэффициенты теплопередачи от межфазной поверхности к воде и пару.

Тепловые потоки 1) с поверхности стенок канала или 2) с поверхности трубочатки определяются следующими выражениями:

$$q_{31} = R_{31}(T_3 - T_1) \quad (3.16)$$

$$q_{32} = R_{32}(T_3 - T_2), \quad (3.17)$$

где  $R_{31}$ ,  $R_{32}$  – коэффициенты теплопередачи от внешней поверхности к воде и пару.

### Уравнение состояния пароводяной смеси

$$\rho_1 = \rho_1(P_0, i_1), \rho_2 = \rho_2(P_0, i_2) \quad (3.18)$$

Термодинамические свойства пароводяной смеси рассчитываются специальной программой THERMO, разработанной в Лос-Аламоской Лаборатории США для кода TRAC-PF1/MOD2, в которой все функции находятся с помощью аппроксимационных полиномов [58].

### Карта режимов течения двухфазной смеси

Границы режимов определяются в соответствии с картой режимов течения двухфазной смеси. В коде STEG используется карта режимов течения, разработанная для кода TRAC [58], см. Рис. 3.1.

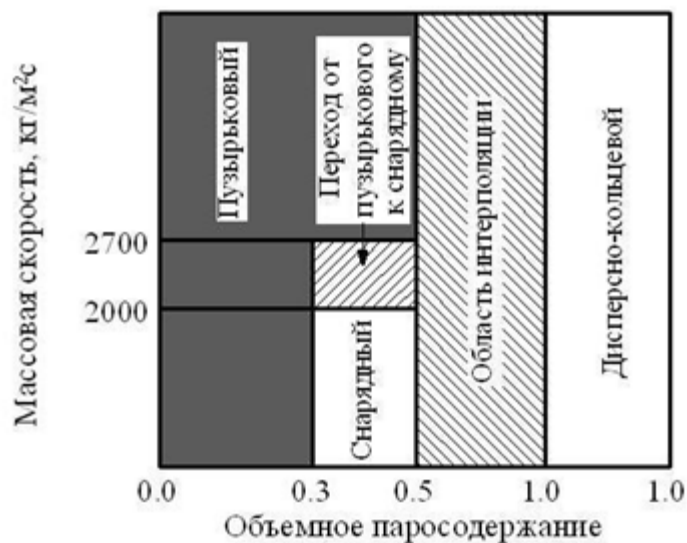


Рис. 3.1 – Карта режимов двухфазного потока

### Законы межфазного взаимодействия

#### Межфазное сопротивление

Для описания межфазного силового взаимодействия пользователь кода STEG может использовать одну из трех моделей, краткое изложение которых приводится ниже.

#### Модель Simovic et al. [59]

В [59] рассматриваются два режима течения: пузырьковый ( $\varphi \leq 0,3$ ), и эмульсионный ( $0,3 < \varphi < 1$ ).

При описании пузырькового режима для коэффициента межфазного сопротивления используется соотношение:

$$\frac{C_D}{D_p} = 0,267 k(\alpha_3) \left( \frac{g \Delta \rho}{\sigma} \right)^{1/2} \left\{ \frac{1 + 17.67 f(\varphi)^{6/7}}{18.67 f(\varphi)} \right\}^2, \quad (3.19)$$

где

$$f(\varphi) = (1 - \varphi)^{1.5} \quad (3.20)$$

$$k(\alpha_3) = \begin{cases} 1, & \text{если } \alpha_3 \geq 0,1 \\ 2,5, & \text{если } \alpha_3 < 0,1 \end{cases} \quad (3.21)$$

При описании эмульсионного режима для коэффициента межфазного сопротивления применяется соотношение:

$$\frac{C_D}{D_p} = 1,487 k(\alpha_3) \left( \frac{g \Delta \rho}{\sigma} \right)^{1/2} (1 - \varphi)^3 (1 - 0,75 \varphi)^2 \quad (3.22)$$

где  $\alpha_3$  – объемная доля трубочатки.

#### Модель межфазного сопротивления кода TRAC-PF1/MOD2 [58]

Модель кода TRAC-PF1/MOD2 существенно сложнее модели [59] и подробно изложена в [58]. Приведем лишь основные положения данной

модели. Для пузырькового режима ( $\varphi \leq 0,3$ ) сила межфазного взаимодействия имеет вид:

$$F_{21} = \frac{3}{4} \varphi \rho_1 \frac{C_D}{D_p} P_s |u_2 - u_1| (u_2 - u_1), \quad (3.23)$$

где  $P_s$  – коэффициент миграции легкой фазы в область с повышенной скоростью,  $C_D$  – коэффициент сопротивления.

Для дисперсно-пленочного режима ( $0,75 \leq \varphi \leq 1$ ):

$$F_{21} = F_{id} + F_{if}, \quad (3.24)$$

где  $F_{id}$  – сила взаимодействия с каплями жидкости,  $F_{if}$  – сила взаимодействия с пленкой жидкости.

В диапазоне паросодержаний  $0,3 \leq \varphi \leq 0,75$  используется линейная интерполяция между соотношениями (3.23) и (3.24).

#### Модель межфазного сопротивления кода TRACE [60]

Для пузырьково-снарядного режима течения используется корреляция:

$$C_{12,BS} = \frac{\varphi (1 - \varphi)^3 g \Delta \rho}{V_{gj}^2} P_s, \quad (3.25)$$

где  $V_{gj}$  – скорость дрейфа

Для дисперсно-пленочного режима:

$$C_{12,Ai} = C_{12f} + C_{12d} \frac{V_{r,d}^2}{(V_2 - V_1)^2}, \quad (3.26)$$

Суммарный коэффициент межфазного сопротивления:

$$C_{12} = \sqrt{C_{12,BS}^2 + C_{12,AM}^2}, \quad (3.27)$$

## Теплообмен между фазами

Рассматриваемые ниже течения двухфазного потока по существу адиабатные, когда температуры фаз приблизительно равны. В этих условиях теплообмен между фазами практически отсутствует. Поэтому моделирование теплообмена является формальным, его требует «двухтемпературное» описание пароводяной среды.

Для описания межфазного теплообмена между паром и водой рассматриваются два режима.

1. Объемное паросодержание  $\varphi < 0,7$

$$R_{i1} = \frac{6\varphi\lambda_1}{d_2^2} (2 + 0.6Re_2^{\frac{1}{2}}Pr_1^{\frac{1}{3}}) \quad (3.28)$$

$$R_{i2} = \frac{12\varphi\lambda_2}{d_2^2} \quad (3.29)$$

2. Объемное паросодержание  $0,7 \leq \varphi \leq 1$

$$R_{i1} = \frac{12(1-\varphi)\lambda_1}{d_1^2} \quad (3.30)$$

$$R_{i2} = \frac{6(1-\varphi)\lambda_2}{d_1^2} \left( 2 + 0.6Re_1^{\frac{1}{2}}Pr_2^{\frac{1}{3}} \right), \quad (3.31)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности воды и пара,  $Pr_1, Pr_2$  – числа Прандтля для капель воды и пузырьков пара,  $Re_1, Re_2$  – числа Рейнольдса для капель воды и пузырьков пара,  $d_1$  – размер капель воды,  $D_b=d_2$  – размер пузырьков пара.

## Описание взаимодействия двухфазного потока с трубным пучком и стенками канала

### Сопrotивление потока о трубный пучок и стенку канала



Код STEG содержит различные опции по моделированию трения потока о внешние конструкции (трубчатка, стенка канала).

Для описания трения двухфазного потока о трубчатку, используется методика А.В. Колбасникова, основанная на обширном банке экспериментальных данных по обтеканию трубчатки [113, 114]. В этой методике вводится коэффициент, характеризующий негомогенность потока двухфазной среды  $\psi$ . Коэффициент сопротивления о трубчатку получается умножением коэффициента сопротивления для однофазного потока на коэффициент негомогенности. На основе опытных данных была предложена следующая методика определения коэффициента негомогенности:

$$\psi = AX^B, \quad (3.32)$$

где  $A, B$  – коэффициенты;  $X$  – массовое расходное паросодержание.

Коэффициент  $\psi$  для коридорного пучка рассчитывался по соотношениям:

а) При  $0,02 \leq X \leq X_1$  и  $0,05 \leq W_0 \leq 0,43$  м/с:

$$A = 52,6 * (\text{Re} * Fr)^{-0,0674} \quad (3.33)$$

$$B = 1,03 * (\text{Re} * Fr)^{-0,0208} \quad (3.34)$$

б) При  $X_1 \leq X \leq 1,0$  и  $0,05 \leq W_0 \leq 0,43$  м/с:

$$A = 1,0 \quad (3.35)$$

$$B = -40,58 * \rho_0^{-0,279} (\text{Re} * Fr)^{-0,359},$$

где  $X_1 = 2,78 * \rho_0^{-0,162} (\text{Re} * Fr)^{-0,293}$ ,  $\rho_0 = \frac{\rho' - \rho''}{\rho''}$ ,  $W_0$  – скорость

циркуляции,  $\rho'$ ,  $\rho''$  - плотность воды и пара на линии насыщения.

Коэффициент  $\psi$  для шахматного пучка рассчитывался по соотношениям:

а) При  $0,02 \leq X \leq X_1$  и  $0,05 \leq W_0 \leq 0,93$  м/с:

$$A = 4,43 * (Re * Fr)^{-0,0295} \quad (3.36)$$

$$B = 0,375 * (Re * Fr)^{-0,0212} \quad (3.37)$$

б) При  $X_2 \leq X \leq 1,0$  и  $0,05 \leq W_0 \leq 0,93$  м/с:

$$A = 1,0 \quad (3.38)$$

$$B = -0,554 * (Re * Fr)^{-0,0239},$$

где  $X_2 = 0,195 * (Re * Fr)^{-0,0239}$ .

Для моделирования сопротивления потока о стенку канала используются описание сопротивления, основанное на использовании «всережимной» корреляции, разработанной для кода TRAC. Коэффициенты сопротивления воды и пара о внешнюю поверхность  $C_{13}$ ,  $C_{23}$  определяются по следующим зависимостям:

$$C_{13} = \frac{\alpha_1 \rho_1 C_{f1}}{D} \quad (3.39)$$

$$C_{23} = \frac{\alpha_2 \rho_2 C_{f2}}{D}, \quad (3.40)$$

где коэффициенты  $C_{f1}$ ,  $C_{f2}$  вычисляются, как предложено в [115].

Сначала вычисляется параметр  $f$

$$f = 2 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(a + b)^{3/2}} \right]^{1/12}, \quad (3.41)$$

где:

$$a = \left[ 2.475 \cdot \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27\epsilon} \right) \right]^{16} \quad (3.42)$$

$$b = \left( \frac{37356}{Re} \right)^{16}, \quad (3.43)$$

где  $\epsilon$  – относительная шероховатость поверхности.

Число  $Re$  определяется по гидравлическому диаметру канала, средней плотности двухфазной среды, при этом динамическая вязкость двухфазной среды  $\mu$  вычисляется следующим образом [58]:

$$\mu = \left[ \frac{X_f}{\mu_2} + \frac{(1 - X_f)}{\mu_1} \right]^{-1}, \quad (3.44)$$

где  $X_f$  – массовое расходное паросодержание.

Принимается, что  $C_{f1} = C_{f2} = 2f$ .

#### Теплообмен между трубным пучком и двухфазным потоком

В коде STEG описание теплообмена между стенкой канала (трубчаткой) и двухфазным пароводяным потоком осуществляется по формуле ЦКТИ для больших объемов [116].

### 3.2 Результаты валидации кода STEG на опытных данных, полученных на стенде ПГВ

Результаты расчетов экспериментов на стенде ПГВ с помощью исходной версии кода STEG показали существенное расхождение с экспериментальными данными.

При сопоставлении результатов расчетов и экспериментов наблюдались следующие закономерности:

- расчетные объемные паросодержания под ПДЛ были занижены;
- расчетные объемные паросодержания над ПДЛ были завышены;
- расчетные перепады давления на ПДЛ завышены.

Рис. 3.2 и Рис. 3.3 иллюстрируют этот факт. На Рис. 3.2 показаны экспериментальные и расчетные паросодержания над и под ПДЛ для режима П1.4, в котором применялась равномерная перфорация ПДЛ и равномерная подача пара (подробное описание всех экспериментальных режимов приведено в [61]). На Рис. 3.3 для этого же режима представлены экспериментальные и расчетные перепады давления на ПДЛ.

В связи с этим была проведена большая работа по совершенствованию моделей кода STEG, позволившая существенно улучшить согласие расчетных и экспериментальных результатов.

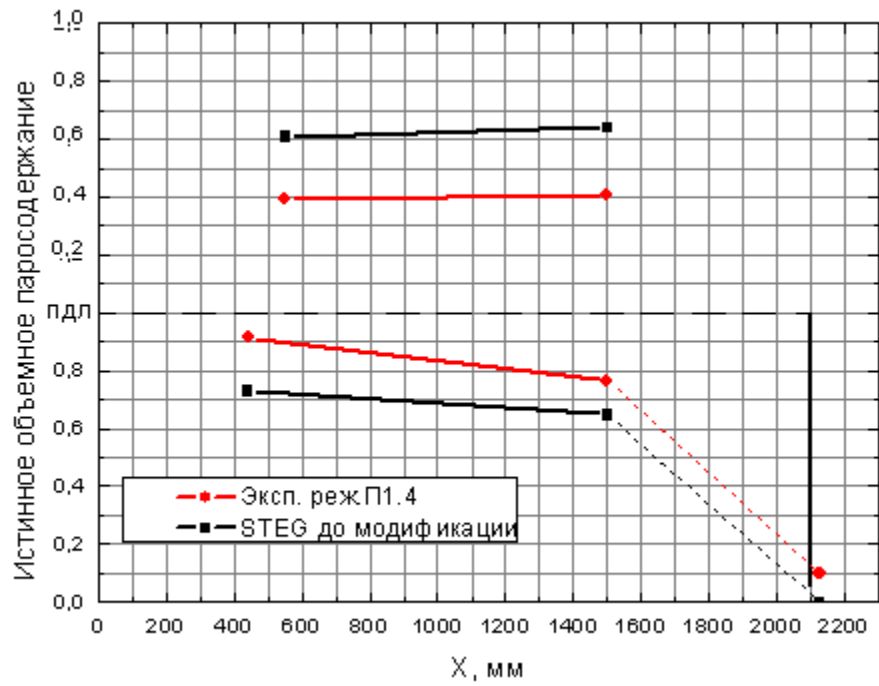


Рис. 3.2 – Расчетные и экспериментальные объемные паросодержания под и над ПДЛ

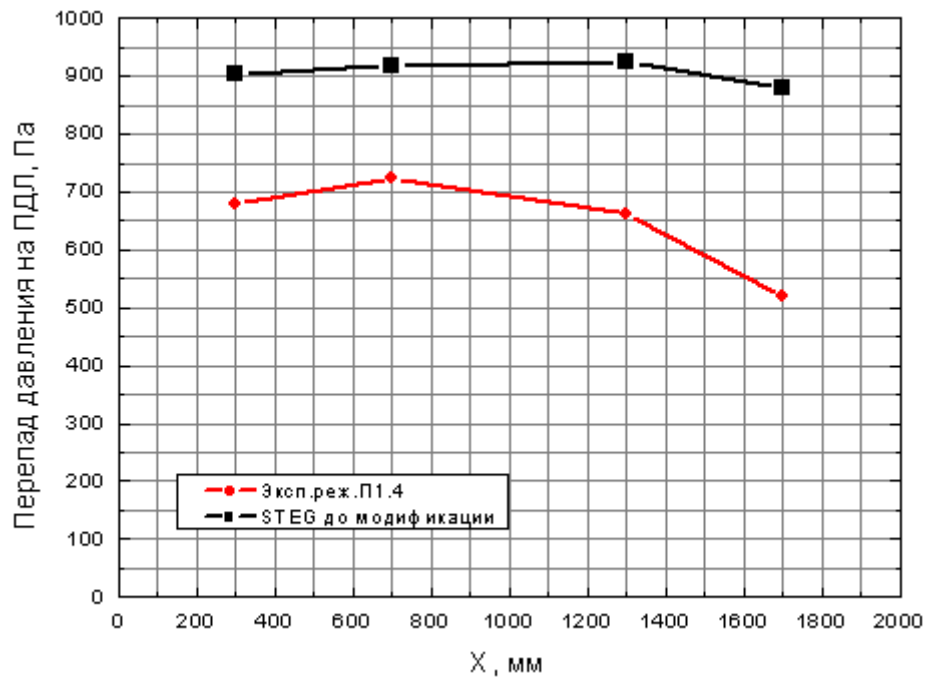


Рис. 3.3 – Расчетные и экспериментальные перепады давления на ПДЛ вдоль его длины

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Представлено описание кода STEG, предназначенного для численного моделирования теплогидравлических процессов во втором контуре горизонтального парогенератора.

2. Расчеты экспериментов на стенде ПГВ исходной версией кода STEG показали неудовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных результатов.

3. Необходимо усовершенствование моделей кода STEG, чтобы улучшить согласие расчетных и экспериментальных результатов.

## ГЛАВА 4 УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ОБЪЕМЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В КОДЕ STEG

Как отмечалось в Главе 3, валидация кода STEG на экспериментальных данных, полученных на стенде ПГВ, принесла неудовлетворительные результаты. В связи с этим, диссертантом была проведена работа по усовершенствованию математических моделей кода STEG, которая будет изложена в настоящей Главе.

### 4.1 Усовершенствование описания межфазного сопротивления

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:

$$\frac{C_{i,\text{mod}}}{C_i} = 1 - A \left\{ 1 - \left[ \frac{\varphi - 0,5(\psi_l + \psi_r)}{0,5(\psi_r - \psi_l)} \right]^2 \right\} \quad (4.1)$$

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

Параметр  $A$  определяет масштаб и направление изменения:

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

если  $A < 0$ , то  $C_{i,mod} > C_i$

Рис. 4.1 и Рис. 4.2 иллюстрируют корректирующую функцию для типичных значений ее параметров.

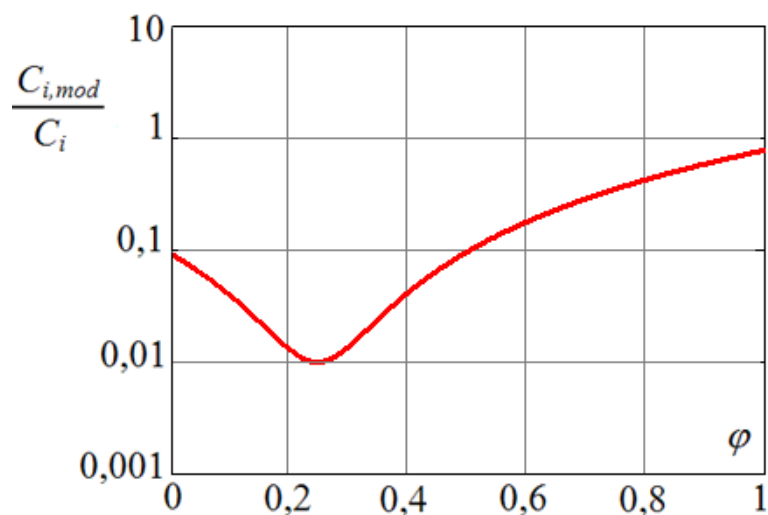


Рис. 4.1 – Зависимость (4.1) для  $A=0,99$ ,  $\psi_1=-0,6$ ,  $\psi_r=1,1$

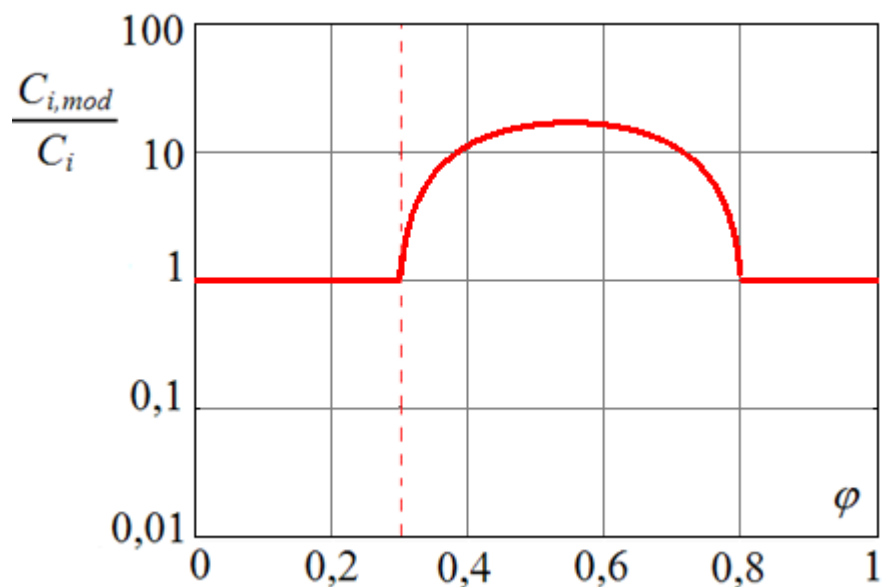


Рис. 4.2 – Зависимость (4.1) для  $A=-16$ ,  $\psi_1=0,3$ ,  $\psi_r=0,8$

Введение корректирующей функции для межфазного сопротивления потребовало определения ее параметров. На первом этапе определения



параметров выполнялись варианты расчеты экспериментальных режимов с равномерной перфорацией ПДЛ и с равномерной подачей пара.

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

$$\Delta P_{\text{ПДЛ}} = \xi \cdot \frac{\rho'' (w''_{\text{отв}})^2}{2} \quad (4.2)$$

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  $A$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_r$  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**).

Коэффициент стохастической аппроксимации (**SAR**) определялся следующим образом. Пусть  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  – экспериментальные значения,  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  – расчетные значения. Тогда, формула для коэффициента **SAR** имеет следующий вид [117, 118]:

$$SAR = \left( 1 - \frac{\sqrt{a_{y-z}}}{\sqrt{a_y} + \sqrt{a_z}} \right)^2 \quad (4.3)$$

$$a_{y-z} = \sum_{i=1}^n (Y_i - Z_i)^2 \quad (4.4)$$

$$a_y = \sum_{i=1}^n Y_i^2 \quad (4.5)$$

$$a_z = \sum_{i=1}^n Z_i^2 \quad (4.6)$$

Среднее отклонение определялось следующим образом:

$$\tilde{M} = \frac{|Y_i - Z_i|}{n} \quad (4.7)$$

В качестве базовой модели межфазного сопротивления, параметры которой варьировались, была выбрана модель [59].

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:

в области выше ПДЛ:  $A = 0,99$ ,  $\psi_1 = -0,6$ ,  $\psi_r = 1,1$

в области ниже ПДЛ:  $A = -16$ ,  $\psi_1 = 0,3$ ,  $\psi_r = 0,8$

Таким образом, в области над ПДЛ модель межфазного сопротивления [59] 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 [59].

В области под ПДЛ двухфазные течения имеют сложную 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 [59] основана на рассмотрении для данного случая эмульсионного режима течения двухфазной среды, что, видимо, недостаточно для описания рассматриваемого случая и потребовала своей модификации.

В качестве иллюстрации в Табл. 4.1 – Табл. 4.3 приведены примеры результатов вариантных расчетов, в ходе которых были определены оптимальные параметры  $A$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_r$ .

Табл. 4.1 – Параметрические расчеты режима П1.4

А над ПДЛ	Эксп. данные	0	0,5	0,9	0,99	0,99	0,99	0,99
А под ПДЛ		0	0	0	0	-2	-8	-16
RA01L02	0,579	0,536	0,554	0,579	0,570	0,563	0,568	0,568
RA01L03	0,218	0,242	0,237	0,218	0,215	0,204	0,210	0,213
RA01V01	0,913	0,739	0,733	0,718	0,728	0,789	0,851	0,873
RA01V02	0,765	0,653	0,648	0,647	0,648	0,706	0,741	0,759
RA01V03	0,39	0,626	0,573	0,475	0,382	0,418	0,401	0,393
RA01V04	0,404	0,639	0,583	0,473	0,369	0,403	0,384	0,374
RA01V05	0,097	0,033	0,015	0	0	0	0	0,005
SAR		0,742	0,771	0,812	0,828	0,876	0,916	0,926
Среднее отклонение		0,127	0,112	0,081	0,065	0,050	0,033	0,027

Табл. 4.2 – Параметрические расчеты режима П2.1

А над ПДЛ	Эксп. данные	0	0,5	0,9	0,99	0,99	0,99	0,99
А под ПДЛ		0	0	0	0	-2	-8	-16
RA01L02	0,540	0,486	0,499	0,527	0,525	0,527	0,532	0,532
RA01L03	0,173	0,192	0,185	0,172	0,170	0,170	0,172	0,174
RA01V01	0,95	0,745	0,725	0,725	0,740	0,794	0,851	0,867
RA01V02	0,828	0,722	0,665	0,665	0,669	0,720	0,756	0,772
RA01V03	0,498	0,644	0,602	0,494	0,530	0,529	0,524	0,521
RA01V04	0,463	0,639	0,618	0,513	0,519	0,517	0,512	0,508
RA01V05	0,059	0,031	0	0,004	0	0	0	0,002
SAR		0,791	0,780	0,808	0,816	0,862	0,903	0,917
Среднее отклонение		0,104	0,108	0,073	0,076	0,061	0,045	0,039

Табл. 4.3 – Параметрические расчеты режима П2.6

А над ПДЛ	Эксп. данные	0	0,5	0,9	0,99	0,99	0,99	0,99
А под ПДЛ		0	0	0	0	-2	-8	-16
RA01L02	0,601	0,552	0,562	0,606	0,591	0,589	0,594	0,598
RA01L03	0,233	0,266	0,255	0,246	0,236	0,234	0,236	0,237
RA01V01	0,914	0,753	0,725	0,717	0,726	0,783	0,843	0,864
RA01V02	0,819	0,700	0,657	0,655	0,660	0,714	0,751	0,768
RA01V03	0,306	0,624	0,593	0,485	0,317	0,324	0,319	0,318
RA01V04	0,352	0,641	0,603	0,486	0,304	0,309	0,304	0,303
RA01V05	0,077	0,031	0,006	0	0	0	0	0
SAR		0,699	0,703	0,765	0,813	0,865	0,905	0,915
Среднее отклонение		0,144	0,145	0,110	0,071	0,055	0,041	0,037

#### 4.2 Усовершенствование модели гидросопротивления ПДЛ двухфазному потоку

Расчеты, выполненные в предыдущем разделе, использовали экспериментально определенные значения коэффициентов гидравлического сопротивления ПДЛ. В общем случае, эти значения неизвестны. Поэтому, для проведения последующих расчетов в код STEG была внедрена новая модель гидросопротивления ПДЛ. Она основана на результатах анализа опытных данных экспериментов на стенде ПГВ (см. Глава 2), изложенных в [61].

Расчет перепада давления на ПДЛ осуществляется по формуле:

$$\Delta P_{\text{ПДЛ}} = \xi \cdot \frac{\rho'' (w''_{\text{отв}})^2}{2} \cdot \Psi \quad (4.8)$$

При этом для параметра  $\psi$ , описывающего поправку на двухфазность, в соответствие с результатами, изложенными в [61], могут быть использованы три опции расчета:

$$\Psi_{\text{ид1}} = 1,82 - 1,34 \cdot \bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}} \quad (4.9)$$

$$\Psi_{\text{ид2}} = 1,64 - 1,18 \cdot \bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}} \quad (4.10)$$

$$\Psi_{\text{кар}} = 1,90 - 1,36 \cdot \bar{\varphi}_{\text{под ПДЛ}} \quad (4.11)$$

Формулы (4.9 – (4.11) применимы в диапазоне  $0,6 < \varphi < 1,0$ . При  $\varphi < 0,6$  используется значение параметра  $\psi$  при  $\varphi=0,6$ . Следует отметить, что диапазон значений  $\varphi < 0,6$  не является типичным для значений паросодержания под ПДЛ.

#### 4.3 Внедрение уравнения переноса межфазной поверхности

Описанию течений двухфазных сред было посвящено много исследований, результаты которых обобщены в монографиях [66–70]. На основе разработанных математических моделей были созданы системные теплогидравлические коды для анализа безопасности АЭС различного типа [71–80]. Эти коды используют карты режимов течения двухфазного потока, выделяющие его типичные структуры в любой локальной области в зависимости от истинного объемного паросодержания и массовой скорости среды (пузырьковое течение, дисперсно-кольцевое течение и т.п.). Величина межфазной поверхности, необходимая для вычисления межфазного взаимодействия, в этих кодах определяется по текущим значениям характеристик фаз (скорости, объемное паросодержание и т.д.), исходя из

которых рассчитываются размеры дисперсных включений (пузырьки, капли) по критериям типа критерия Вебера и площадь межфазной поверхности.

Для более точного вычисления площади межфазной поверхности в [81, 82, 86] было предложено уравнение переноса межфазной поверхности, которое описывает изменение этой площади с течением времени и в зависимости от пространственных координат с учетом ее движения, коалесценции и фрагментации дисперсных образований.

Уравнение переноса межфазной поверхности в двухфазном потоке имеет следующий вид:

$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + \text{div}(a_i u_i) = \frac{2}{3} \frac{a_i}{\alpha} \left[ \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \text{div}(\alpha u_g) - \eta_{ph} \right] + \left( \sum_j \phi_j + \phi_{ph} \right), \quad (4.12)$$

где  $a_i$  – концентрация площади межфазной поверхности, 1/м;  $u_i$  – скорость движения межфазной поверхности, м/с;  $\alpha$  – объемная доля пара;  $u_g$  – скорость движения газовой фазы, м/с;  $\eta_{ph}$  – скорость генерации парового объема в единичном объеме пароводяной смеси при образовании зародышей пузырьков пара в перегретой воде или зародышей капелек воды в переохлажденном паре;  $\phi_j$  – изменение межфазной поверхности вследствие  $j$ -го процесса взаимодействия;  $\phi_{ph}$  – изменение межфазной поверхности вследствие фазового перехода.

Слагаемые в левой части представляют собой изменение во времени и конвективный перенос концентрации межфазной поверхности, слагаемые в правой части – изменение концентрации межфазной поверхности за счет изменения объема частицы вследствие изменения давления, различных взаимодействий части и фазового перехода, соответственно.

Анализ литературы показал, что выявлены и проанализированы следующие механизмы слияния и дробления дисперсных частиц [81–84]:

- коалесценция пузырьков под воздействием случайных соударений [85–97];
- коалесценция из-за ускорения в следе пузырька [98–101];
- расщепление пузырьков под воздействием турбулентных вихрей [102–105].

**Первый механизм** – коалесценция пузырьков вследствие хаотичных столкновений, вызванных турбулентными пульсациями в жидкой фазе (Рис. 4.3):

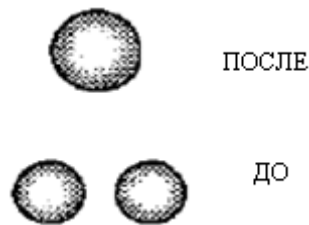


Рис. 4.3 – Коалесценция пузырьков вследствие хаотичных столкновений

Скорость изменения межфазной поверхности в единице объема пароводяной среды за счет данного механизма выражается следующей формулой:

$$\phi_{RC} = \frac{-\Gamma_{RC}\alpha^2\varepsilon^{1/3}}{D_b^{5/3}} \left[ \frac{1}{\alpha_{max}^{1/3}(\alpha_{max}^{1/3} - \alpha^{1/3})} \right] \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-C \frac{\alpha_{max}^{1/3}\alpha^{1/3}}{\alpha_{max}^{1/3} - \alpha^{1/3}}\right) \right\}, \quad (4.13)$$

где  $\varepsilon$  – скорость диссипации турбулентной энергии в единице массы жидкой фазы,  $D_b$  – диаметр пузырька,  $\alpha_{max}$  – максимально возможное значение истинного объемного паросодержания, соответствующее наиболее плотной упаковке объема идентичными паровыми сферами ( $\alpha_{max} = 0,741$ ),  $\Gamma_{RC}$ ,  $C$  – настраиваемые параметры.



**Второй механизм** – слияние с пузырьком – лидером пузырьков, ускоренно движущихся в его следе (Рис. 4.4);

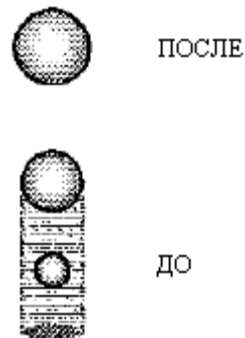


Рис. 4.4 – Коалесценция пузырьков вследствие слияния с пузырьком-лидером

Скорость изменения межфазной поверхности в единице объема пароводяной среды за счет данного механизма выражается следующей формулой:

$$\phi_{WE} = - \frac{\Gamma_{WE} C_D^{1/3} u_r \alpha^2}{D_b^2}, \quad (4.14)$$

где  $u_r$  - относительная скорость между лидирующим пузырьком и жидкой фазой,  $C_D$  – коэффициент трения,  $\Gamma_{WE}$  – настраиваемый параметр.

**Третий механизм** – дробление пузырьков под воздействием турбулентных вихрей в жидкости (Рис. 4.5):

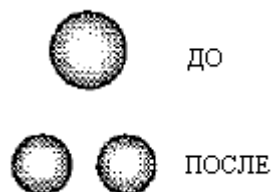


Рис. 4.5 – Дробление пузырьков под воздействием турбулентных вихре

Скорость изменения межфазной поверхности в единице объема пароводяной среды за счет данного механизма выражается следующей формулой:

$$\phi_{TI} = \begin{cases} 0 & \text{при } We \leq We_{crit} \\ \frac{\Gamma_{TI} \alpha \varepsilon^{1/3}}{D_b^{5/3}} \left(1 - \frac{We_{crit}}{We}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{We_{crit}}{We}\right) & \text{при } We > We_{crit} \end{cases}, \quad (4.15)$$

где  $We$  – число Вебера,  $We_{crit}$  – критическое число Вебера,  $\Gamma_{TI}$  – настраиваемый параметр.

Фигурирующие в уравнениях скорости изменения межфазной поверхности в единице объема  $\phi_j$  и  $\phi_{ph}$ , где  $j$  – тип механизма взаимодействия частиц, выражаются следующими формулами:

$$\phi_j = \frac{1}{3\psi} \left(\frac{\alpha}{a_i}\right)^2 R_j \quad (4.16)$$

$$\phi_{ph} = \pi D_{bc}^2 R_{ph}, \quad (4.17)$$

где  $R_j$ ,  $R_{ph}$  – скорость появления/исчезновения частиц за счет  $j$ -го взаимодействия и фазового перехода, соответственно;  $\psi$  – параметр формы частицы.

$$\psi = \frac{1}{36} \left(\frac{D_{sm}}{D_e}\right)^3 \quad (4.18)$$

Диссертантом было внедрено в код STEG уравнение переноса концентрации межфазной поверхности для пузырькового режима течения, поскольку этот режим течения наиболее теоретически изучен. Для этого:

- математическая код STEG была дополнена уравнением переноса концентрации площади межфазной поверхности (4.12);

- дополнительно к уравнениям состояния пароводяной смеси было введено уравнение состояния неконденсирующегося газа (воздуха) с целью возможности моделирования водо-воздушных течений (для целей валидации);
- была модернизирована численная схема кода STEG путем ее расширения для интегрирования уравнения переноса концентрации площади межфазной поверхности явным методом.

Версия кода с включенным уравнением переноса межфазной поверхности и уравнением состояния воздуха, адаптированная для моделирования водо-воздушных течений в трубах для валидации на доступных опытных данных была названа CATEQ (Code with Area Transport Equation).

Валидация кода CATEQ на опытных данных [111, 112].

В [111, 112] были выполнены экспериментальные исследования переноса концентрации межфазной поверхности в водо-воздушных потоках при атмосферном давлении. Использовалась вертикальная труба диаметром 48,3 мм и длиной 3 метра. На трех высотных отметках выполнялись измерения объемного паросодержания, скоростей межфазной поверхности, и определялась концентрация межфазной поверхности. Для этого использовался четырех-сенсорный зонд, основанный на измерении проводимости среды.

Для валидации кода CATEQ был выбран режим 2–5, поскольку в этих публикациях для него была представлена наибольшая информация. Параметры данного режима приведены в Табл. 4.4.

Табл. 4.4 – Параметры режима 2-5

Приведенная скорость жидкости, м/с	Приведенная скорость воздуха, м/с
5,1	0,538

Были выполнены вариантные расчеты с помощью кода SATEQ для того, чтобы проследить влияние различных источников членов на результаты расчета и определить наиболее корректный совместный учет всех корреляций для источников членов в уравнении переноса концентрации межфазной поверхности, результаты которых представлены на Рис. 4.6. Видно, что расщепление дисперсных частиц (дробление пузырьков) способствует увеличению концентрации площади межфазной поверхности, а два других типа взаимодействия способствует уменьшению концентрации площади межфазной поверхности (эффект коалесценции).

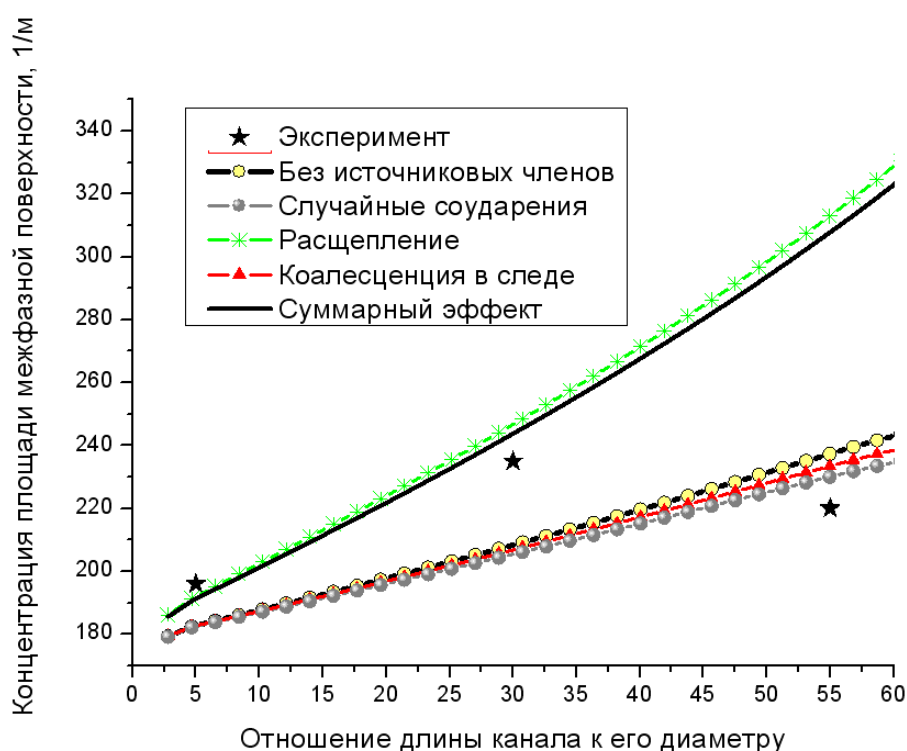


Рис. 4.6 – Влияние типов механического взаимодействия частиц на концентрацию площади межфазной поверхности

Из Рис. 4.6 следует, что основным механизмом, влияющим на изменение площади межфазной поверхности является расщепление пузырьков. Обращает на себя внимание значительное расхождение концентрации площади межфазной поверхности для верхнего датчика. Несмотря на это, другие параметры эксперимента в расчете кодом SATEQ

воспроизводятся с приемлемой точностью, см. Рис. 4.7 – Рис. 4.9. На этих рисунках также приведены графики расчетов кодом TRACE, в который тоже было внедрено уравнение переноса концентрации межфазной поверхности [112].

Таким образом, результаты валидации кода CATEQ на опытных данных режима 2–5 и результаты кросс-верификации с кодом TRACE свидетельствуют о том, что код CATEQ (специальная версия кода STEG) адекватно описывает процесс переноса концентрации межфазной поверхности в пузырьковом режиме.

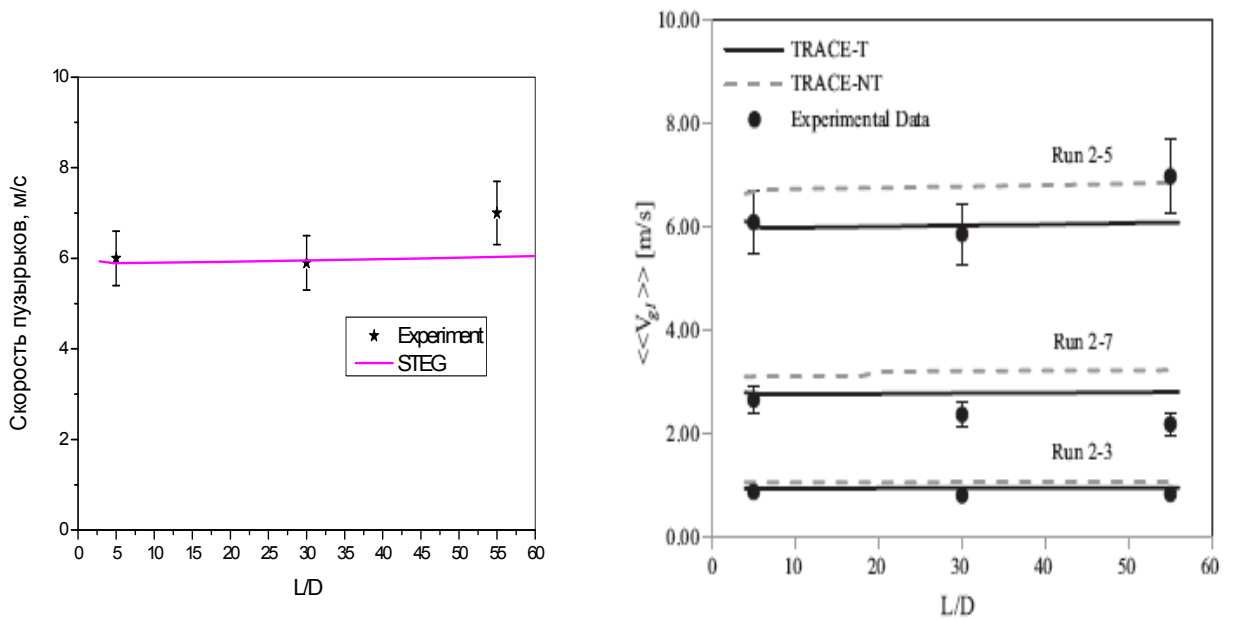


Рис. 4.7 – Распределение скорости дисперсных частиц по высоте трубы

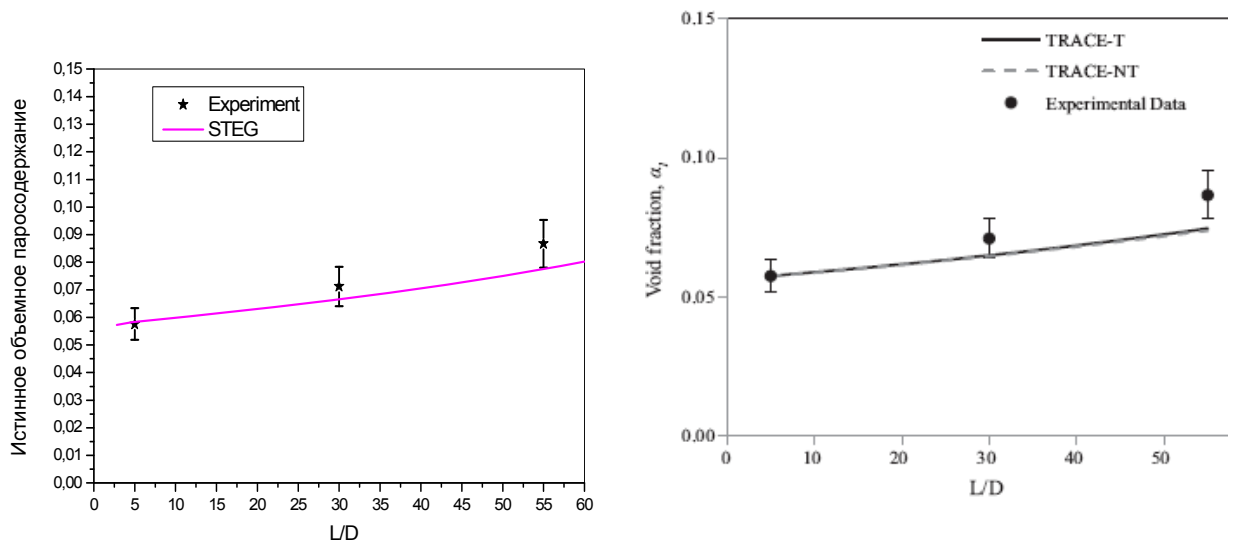


Рис. 4.8 – Распределение паросодержания по высоте трубы

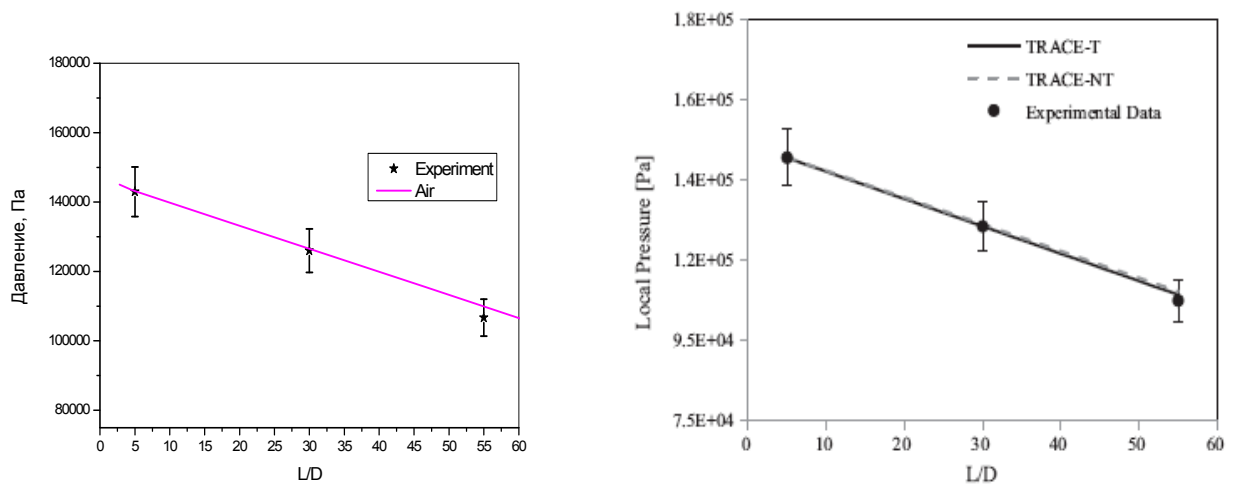


Рис. 4.9 – Распределение давления по высоте трубы

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Была проведена модификация модели [59] межфазного сопротивления: 1) в области над ПДЛ сопротивление уменьшено во всем диапазоне паросодержаний; 2) в области под ПДЛ сопротивление увеличено лишь в переходной области с максимумом при  $\varphi=0,55$ .

2. На основе сопоставления результатов расчетов кодом STEG с модифицированной моделью межфазного сопротивления и опытных данных, полученных на стенде ПГВ, определены оптимальные параметры модифицированной модели межфазного сопротивления.

3. На основе опытных данных, полученных на стенде ПГВ, разработаны новые корреляции для расчета гидросопротивления ПДЛ, учитывающие объемное паросодержание под ПДЛ. Эти корреляции внедрены в код STEG.

4. На основе анализа литературы выбрана модель переноса концентрации площади межфазной поверхности для пузырькового режима течения, которая была валидирована на доступных экспериментальных данных. Эта модель внедрена в код STEG.

## ГЛАВА 5 ВАЛИДАЦИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО КОДА STEG. РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫРАВНИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПДЛ

### 5.1 Валидация усовершенствованного расчетного кода STEG на опытных данных, полученных на стенде ПГВ

С помощью усовершенствованного кода STEG были выполнены валидационные расчеты экспериментальных режимов на стенде ПГВ.

Типичная расчетная картина течения двухфазной среды в рабочем участке стенда ПГВ представлена на Рис. 5.1.

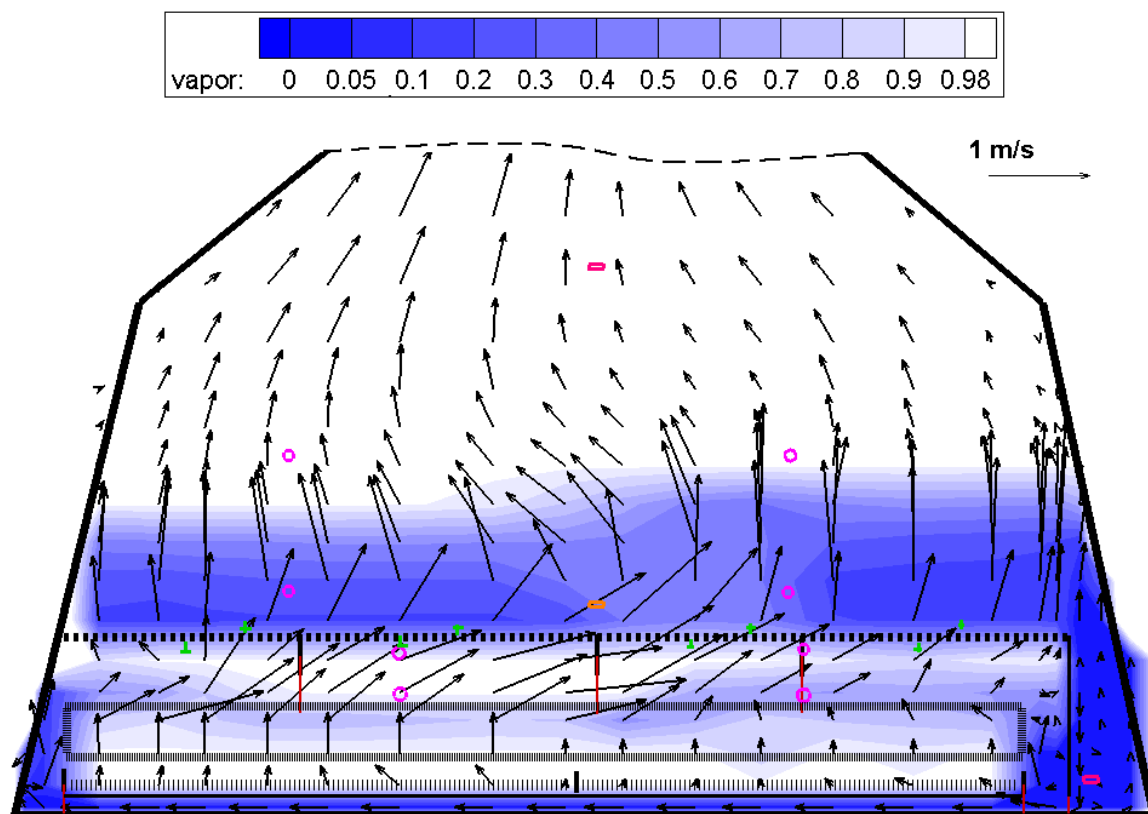


Рис. 5.1 – Распределение скорости пара и истинного объемного паросодержания (неравномерная перфорация 4,1%, 8,3%; неравномерная подача пара 3:1).



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

$$\mathbf{SAR_{\phi} = SAR_{DP01-4} = 1}$$

$$\mathbf{CO_{\phi} = CO DP01-4 = 0}$$

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных приводится в Табл. 5.1 – Табл. 5.4.

Табл. 5.1 – Равномерная перфорация 5,7%, неравномерная подача пара

Режим	П1.1		П1.2		П1.3		П1.4		П1.5		П2.1		П2.4	
	эсп.	расч.	эсп.	расч.	эсп.	расч.	эсп.	расч.	расч.	расч.	эсп.	расч.	эсп.	расч.
RA01L02	0,431	0,429	0,342	0,333	0,429	0,463	0,540	0,534	0,471	0,425	0,579	0,592	0,375	0,356
RA01L03	0,071	0,096	0,027	0,037	0,074	0,111	0,173	0,176	0,113	0,085	0,218	0,232	0,039	0,053
RA01V01	0,859	0,804	0,951	0,802	0,951	0,933	0,95	0,850	0,808	0,800	0,913	0,811	0,946	0,806
RA01V02	0,692	0,763	0,79	0,763	0,812	0,83	0,828	0,770	0,767	0,766	0,765	0,762	0,837	0,769
RA01V03	0,864	0,757	0,972	0,926	0,849	0,694	0,498	0,504	0,691	0,791	0,39	0,323	0,956	0,873
RA01V04	0,875	0,754	0,946	0,893	0,824	0,596	0,463	0,494	0,691	0,794	0,404	0,303	0,967	0,882
RA01V05	0,057	0	0,069	0	0,085	0,092	0,059	0	0,001	0,001	0,097	0	0,07	0
RA01DP01	566	614	516	739	684	674	667	726	804	769	679	688	550	702
RA01DP02	652	665	570	758	787	799	803	764	820	787	723	685	620	751
RA01DP03	583	634	513	627	708	717	673	757	819	811	662	630	607	742
RA01DP04	527	623	433	655	581	571	525	696	751	742	520	627	450	717
RA01DP05	25	15	27	4	27	23	-28	26	8	8	20	15	-15	7
RA01DP06	-25	-19	-21	-23	-22	-12	27	-11	-12	0	-21	-22	16	-11
RA01DP07	-29	-1	-101	-8	-106	-149	-157	-22	-19	-22	-93	1	-170	-18
SAR_φ	<b>0,885</b>		<b>0,897</b>		<b>0,891</b>		<b>0,866</b>		<b>0,882</b>		<b>0,911</b>		<b>0,882</b>	
SAR_DP01-4	<b>0,903</b>		<b>0,707</b>		<b>0,863</b>		<b>0,911</b>		<b>0,842</b>		<b>0,859</b>		<b>0,739</b>	
CO_φ	<b>0,063</b>		<b>0,055</b>		<b>0,055</b>		<b>0,058</b>		<b>0,055</b>		<b>0,038</b>		<b>0,072</b>	
CO DP01-4	<b>0,090</b>		<b>0,368</b>		<b>0,128</b>		<b>0,073</b>		<b>0,157</b>		<b>0,132</b>		<b>0,309</b>	

Табл. 5.2 – Равномерная перфорация 5,7%, равномерная подача пара

Режим	П2.5		П2.6		П2.7		П2.8		П2.9		П2.10	
	эсп.	расч.	эсп.	расч.	эсп.	эсп.	эсп.	расч.	эсп.	расч.	эсп.	эсп.
RA01L02	0,581	0,584	0,601	0,603	0,618	0,616	0,597	0,601	0,6	0,605	0,604	0,606
RA01L03	0,213	0,223	0,233	0,243	0,25	0,261	0,231	0,251	0,232	0,258	0,237	0,258
RA01V01	0,938	0,848	0,914	0,806	0,861	0,766	0,807	0,784	0,752	0,741	0,675	0,765
RA01V02	0,846	0,772	0,819	0,762	0,771	0,739	0,721	0,750	0,664	0,687	0,591	0,734
RA01V03	0,364	0,354	0,306	0,306	0,268	0,241	0,331	0,267	0,328	0,232	0,344	0,239
RA01V04	0,388	0,339	0,352	0,298	0,325	0,243	0,325	0,264	0,309	0,248	0,289	0,239
RA01V05	0,075	0	0,077	0	0,081	0	0,081	0	0,083	0	0,082	0
RA01DP01	720	744	732	692	658	579	488	434	432	355	335	240
RA01DP02	783	764	746	684	655	607	565	459	504	401	416	288
RA01DP03	726	757	690	705	596	565	491	455	418	421	351	287
RA01DP04	475	701	380	651	445	571	415	463	420	400	328	287
RA01DP05	-17	26	-18	17	-15	16	-18	32	-20	23	-24	39
RA01DP06	22	-3	19	6	11	-10	9	-2	11	-2	14	-2
RA01DP07	-183	-27	-221	-21	-66	-13	-51	9	12	-2	-18	2
SAR_φ	<b>0,896</b>		<b>0,889</b>		<b>0,883</b>		<b>0,904</b>		<b>0,884</b>		<b>0,826</b>	
SAR_DP01-4	<b>0,844</b>		<b>0,800</b>		<b>0,867</b>		<b>0,865</b>		<b>0,849</b>		<b>0,738</b>	
CO_φ	<b>0,045</b>		<b>0,046</b>		<b>0,048</b>		<b>0,041</b>		<b>0,045</b>		<b>0,071</b>	
CO DP01-4	<b>0,112</b>		<b>0,152</b>		<b>0,120</b>		<b>0,124</b>		<b>0,119</b>		<b>0,229</b>	

Табл. 5.3 – Равномерная перфорация 5,7%, неравномерная подача пара 3:1

Режим	П4.2		П4.3	
	эксп.	расч.	эксп.	расч.
RA01L02	0,550	0,556	0,439	0,444
RA01L03	0,168	0,167	0,070	0,070
RA01V01	1,0	0,921	1,0	0,897
RA01V02	0,57	0,700	0,577	0,703
RA01V03	0,563	0,577	0,879	0,945
RA01V04	0,474	0,444	0,872	0,725
RA01V05	0,069	0	0,066	0
RA01DP01	960	873	924	1011
RA01DP02	1024	796	938	856
RA01DP03	577	495	602	410
RA01DP04	395	408	315	367
RA01DP05	-48	-9	-48	-5
RA01DP06	-272	-87	-258	-79
RA01DP07	-156	20	-222	27
SAR_φ	<b>0,885</b>		<b>0,864</b>	
SAR_DP01- 4	<b>0,830</b>		<b>0,845</b>	
CO_φ	<b>0,048</b>		<b>0,074</b>	
CO DP01-4	<b>0,140</b>		<b>0,149</b>	

Табл. 5.4 – Неравномерная перфорация 4,1%, 8,3%, равномерная подача пара

Режим	П6.17		П6.18		П6.19	
	эсп.	расч.	эсп.	расч.	эсп.	эсп.
RA01L02	0,605	0,625	0,504	0,519	0,405	0,443
RA01L03	0,246	0,231	0,152	0,123	0,066	0,064
RA01V01	0,855	0,982	0,981	0,920	0,866	0,932
RA01V02	0,742	0,766	0,800	0,760	0,853	0,768
RA01V03	0,259	0,235	0,568	0,655	0,873	0,928
RA01V04	0,387	0,360	0,549	0,567	0,869	0,761
RA01V05	0,085	0	0,081	0	0,075	0,003
RA01DP01	596	512	571	681	613	929
RA01DP02	466	621	595	719	645	872
RA01DP03	502	654	589	608	592	621
RA01DP04	427	477	581	431	603	495
RA01DP05	-18	29	-33	31	-33	19
RA01DP06	-87	-87	-106	-84	-104	-81
RA01DP07	169	9	129	21	111	-2
SAR_φ	<b>0,887</b>		<b>0,908</b>		<b>0,898</b>	
SAR_DP01-4	<b>0,790</b>		<b>0,819</b>		<b>0,725</b>	
CO_φ	<b>0,047</b>		<b>0,047</b>		<b>0,061</b>	
CO DP01-4	<b>0,222</b>		<b>0,176</b>		<b>0,278</b>	

Табл. 5.5 – Неравномерная перфорация 4,1%, 8,3%, неравномерная подача пара 3:1

Режим	П6.14		П6.15		П6.16	
	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	эксп.
RA01L02	0,537	0,564	0,476	0,516	0,439	0,461
RA01L03	0,168	0,140	0,103	0,103	0,068	0,062
RA01V01	0,92	1,004	1,0	1,006	1,0	0,988
RA01V02	0,567	0,715	0,618	0,689	0,62	0,675
RA01V03	0,563	0,604	0,749	0,809	0,866	0,994
RA01V04	0,517	0,423	0,720	0,558	0,835	0,698
RA01V05	0,077	0	0,073	0	0,07	0
RA01DP01	877	857	925	990	885	1156
RA01DP02	831	768	885	816	857	924
RA01DP03	531	546	572	492	540	427
RA01DP04	356	297	397	248	390	235
RA01DP05	-83	-22	-72	-4	-73	-1
RA01DP06	-350	-105	-359	-112	-354	-131
RA01DP07	29	9	-1	31	-4	57
SAR_φ	<b>0,858</b>		<b>0,879</b>		<b>0,883</b>	
SAR_DP01-4	<b>0,934</b>		<b>0,869</b>		<b>0,784</b>	
CO_φ	<b>0,072</b>		<b>0,059</b>		<b>0,062</b>	
CO DP01-4	<b>0,060</b>		<b>0,130</b>		<b>0,227</b>	

На Рис. 5.2 – Рис. 5.7 представлены сопоставления расчетных и экспериментальных параметров для различных случаев перфорации ПДЛ и подачи пара.

Режим П1.4

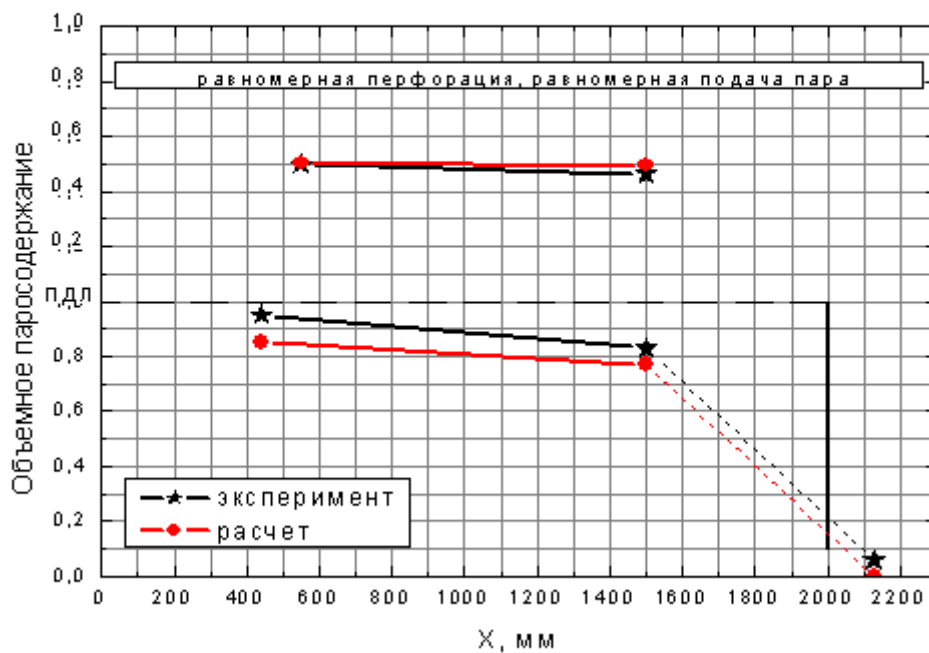


Рис. 5.2 – Расчетные и экспериментальные паросодержания в режиме П1.4

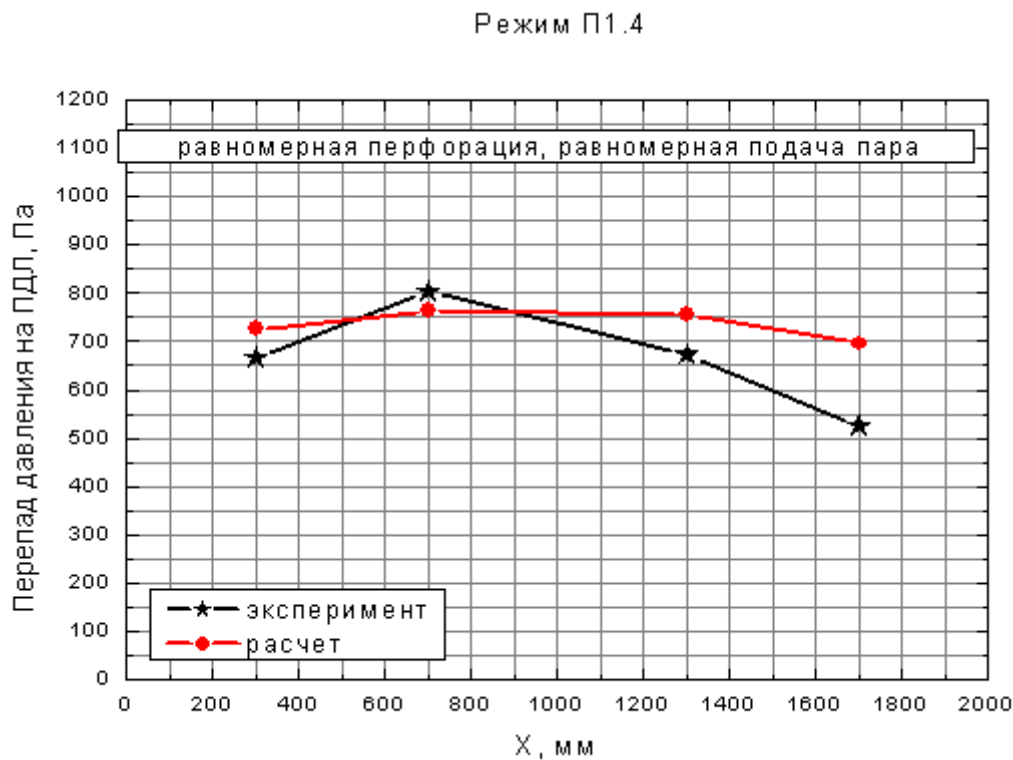


Рис. 5.3 – Расчетные и экспериментальные перепады давления в режиме П1.4

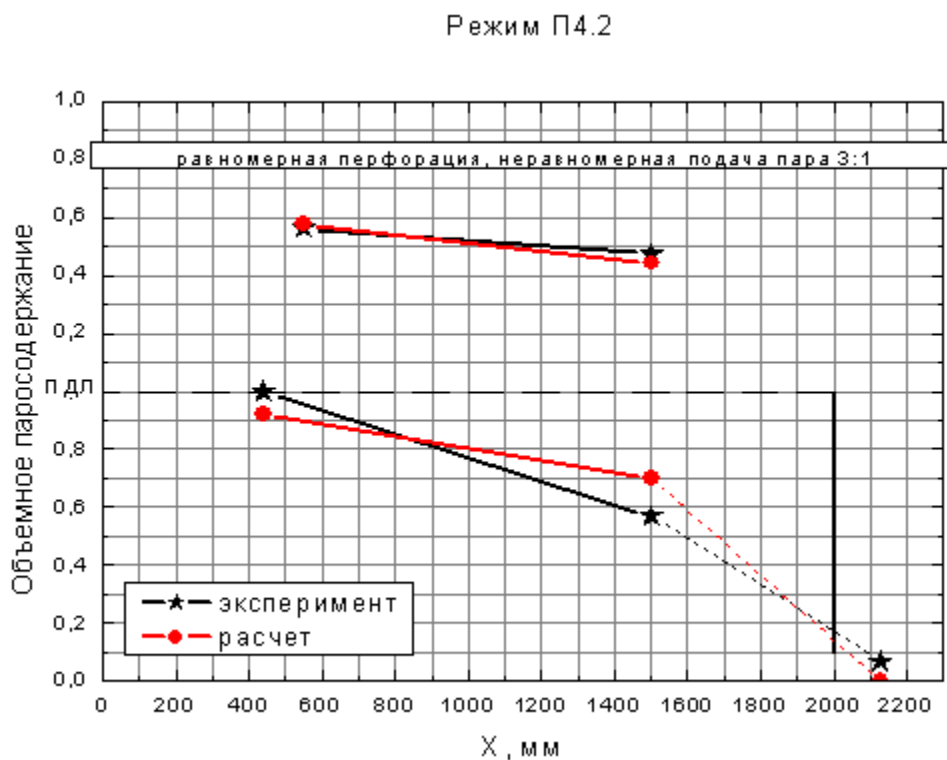


Рис. 5.4 – Расчетные и экспериментальные паросодержания в режиме П4.2



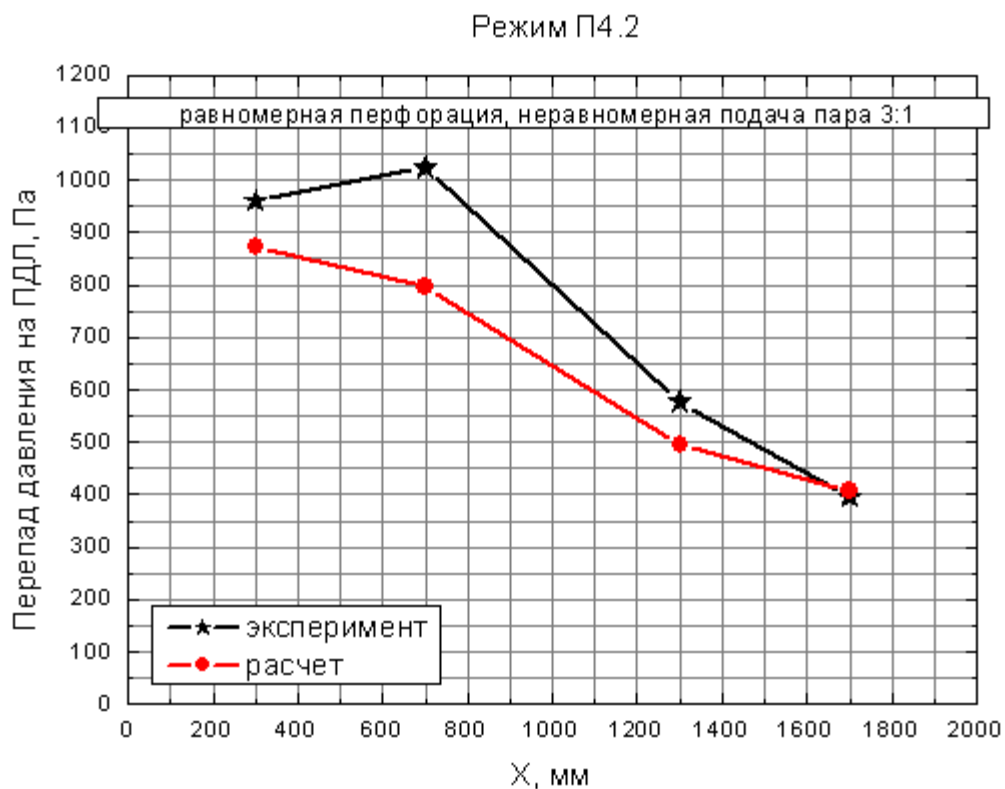


Рис. 5.5 – Расчетные и экспериментальные перепады давления в режиме П4.2

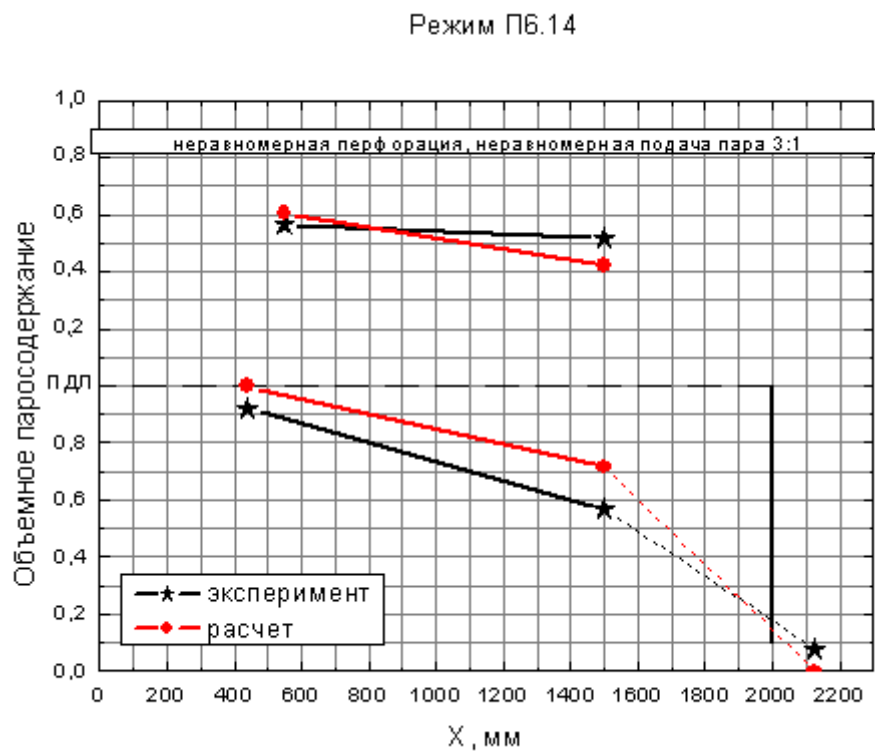


Рис. 5.6 – Расчетные и экспериментальные паросодержания в режиме П6.14

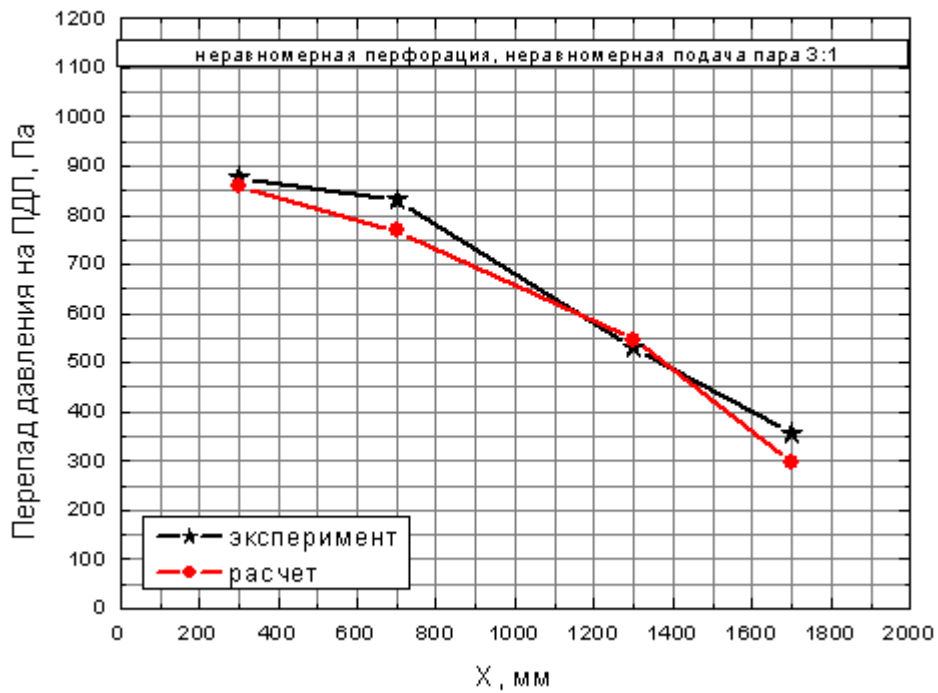


Рис. 5.7 – Расчетные и экспериментальные перепады давления в режиме П6.14

В Табл. 5.6 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. 5.6 – 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

## 5.2 Расчетное исследование выравнивающей способности ПДЛ

Количественные характеристики выравнивающей способности ПДЛ характеризовались с помощью двух параметров, определение которых приводится ниже.

1. Коэффициент выравнивания, характеризующий интегральное перераспределение потока пара после ПДЛ (перетекание пара с горячей стороны на холодную)

$$k_{\text{ПДЛ}} = 1 - \frac{G_{\text{гор,ПДЛ}} - G_{\text{хол,ПДЛ}}}{G_{\text{гор,вход}} - G_{\text{хол,вход}}}, \quad (5.1)$$

где  $G_{\text{гор,вход}}$ ,  $G_{\text{хол,вход}}$  – расходы пара из раздаточного парового коллектора на горячей стороне и на холодной стороне;  $G_{\text{гор,ПДЛ}}$ ,  $G_{\text{хол,ПДЛ}}$  – расходы пара на ПДЛ на горячей стороне и на холодной стороне, соответственно. Значение

$$k_{\text{ПДЛ}} = 1$$

соответствует полному интегральному выравниванию расхода пара.

2. Коэффициент остаточной неравномерности, характеризующий максимальное отклонение локальной приведенной скорости пара на ПДЛ от средней скорости пара на зеркале испарения:

$$k_{\text{ост.нер}} = \frac{w''_{\text{max,ПДЛ}}}{\langle w'' \rangle}, \quad (5.2)$$

где  $w''_{\text{max,ндл}}$  – максимальная приведенная скорость пара на ПДЛ;  $\langle w'' \rangle$  – средняя скорость пара на зеркале испарения.

Значение

$$k_{\text{ост.нер}} = 1$$

соответствует полному выравниванию расхода пара.

Результаты количественной оценки выравнивающей способности ПДЛ для режимов с подачей пара «3:1» приводятся в Табл. 5.7.

Табл. 5.7 – 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
$G_{\text{гор,вход}}$ , кг/с	1,49	1,49	1,51	1,48	1,47
$G_{\text{хол,вход}}$ , кг/с	0,51	0,51	0,53	0,51	0,51
$G_{\text{гор,ПДЛ}}$ , кг/с	1,24	1,29	0,92	0,98	1,06
$G_{\text{хол,ПДЛ}}$ , кг/с	0,76	0,71	1,11	1,00	0,92
Коэф-т выравнивания	<b>0,51</b>	<b>0,40</b>	<b>1,20</b>	<b>1,02</b>	<b>0,85</b>
Коэф-т 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 случаев ПДЛ с равномерной и неравномерной перфорацией приводится на Рис. 5.8, Рис. 5.9. На Рис. 5.9 выделена область выброса пара в середине ПДЛ вблизи границы листов с различной перфорацией.

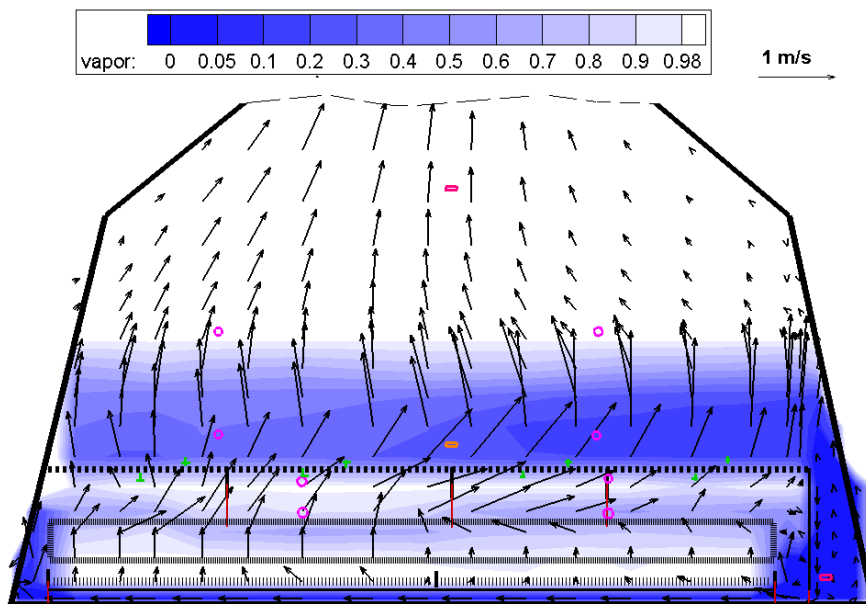


Рис. 5.8 – Распределения скорости пара и объемного паросодержания. Неравномерная подача пара 3:1 (Равномерная перфорация ПДЛ 5,7%)

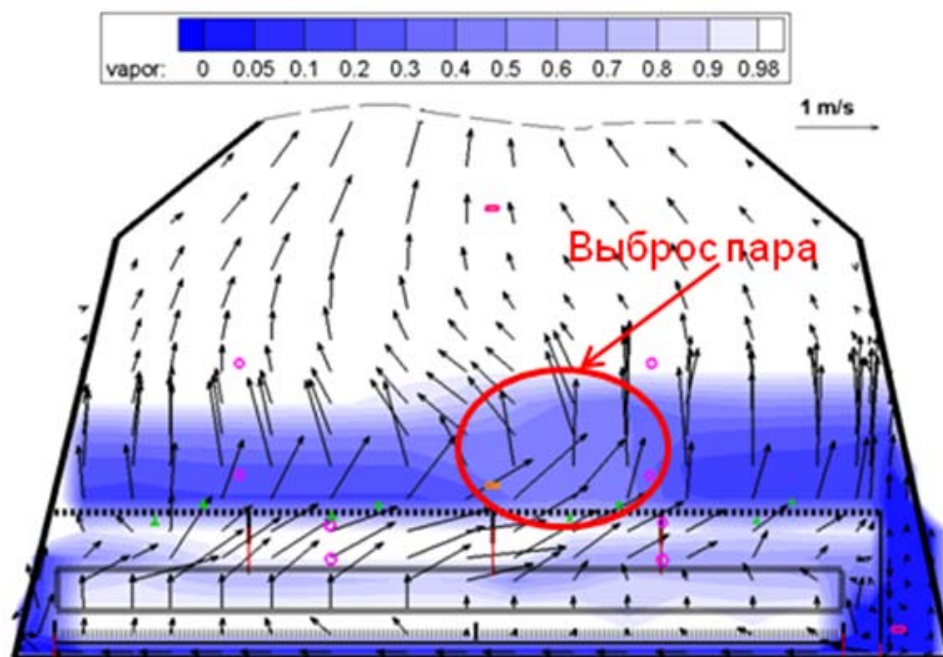


Рис. 5.9 – Распределения скорости пара и объемного паросодержания. Неравномерная подача пара 3:1 (Неравномерная перфорация ПДЛ 4,1% и 8,3%)

Были выполнены вариантные расчеты с целью поиска компоновки ПДЛ из листов с различной перфорацией, обеспечивающей наилучшее выравнивание паровой нагрузки в случае подачи пара 3:1.

На Рис. 5.10 показано распределение приведенной скорости пара вдоль длины ПДЛ для различных вариантов ПДЛ, состоящих из листов с различной перфорацией.

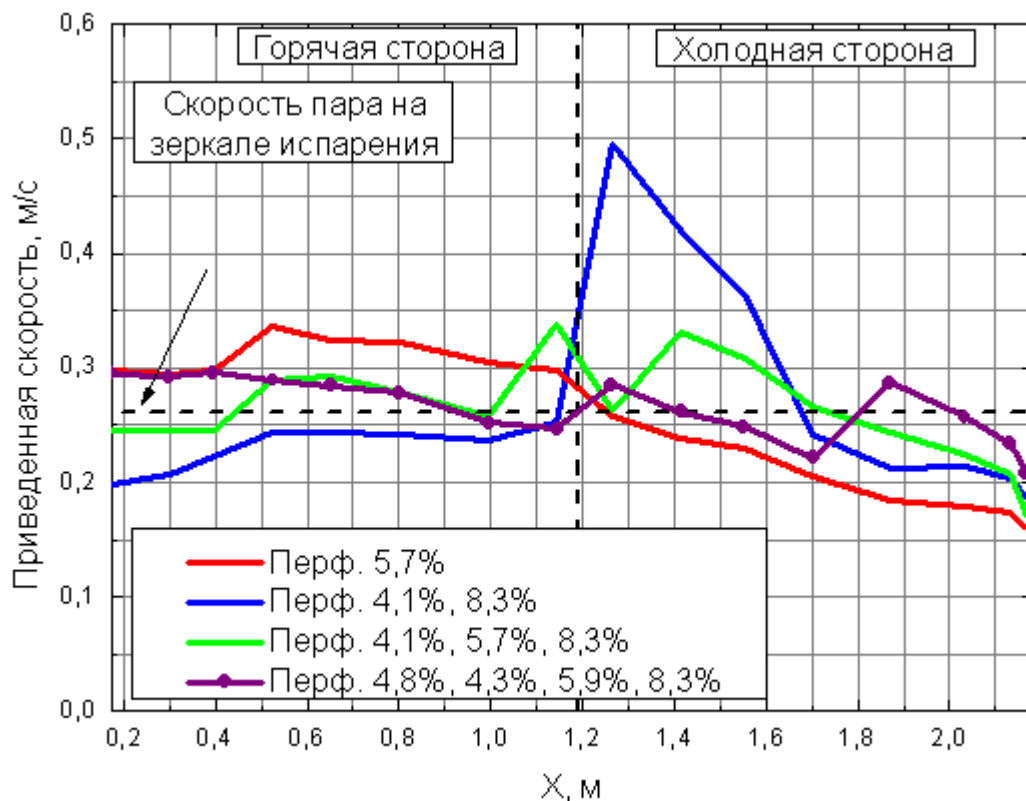


Рис. 5.10 – Распределение приведенной скорости пара вдоль ПДЛ

Зеленая линия на Рис. 5.10 соответствует следующей комбинации листов различной перфорации и различной длины:

<b>4,1%</b>	<b>5,7%</b>	<b>8,3%</b>
-------------	-------------	-------------

Фиолетовая линия на Рис. 5.10 соответствует следующей комбинации листов различной перфорации и различной длины:

<b>4,8%</b>	<b>4,3%</b>	<b>5,9%</b>	<b>8,3%</b>
-------------	-------------	-------------	-------------

В Табл. 5.8 приводятся рассчитанные характеристики выравнивания ПДЛ для различных вариантов компоновки листа.



Табл. 5.8 – Характеристики выравнивания ПДЛ для различных вариантов компоновки

Перфорация ПДЛ	Коэффициент выравнивания	Коэффициент остаточной неравномерности
4,1%	0,72	1,16
5,7%	0,51	1,28
8,3%	0,28	1,40
4,1%, 8,3%	1,20	1,87
4,1%, 5,7%, 8,3%	0,88	1,26
4,8%, 4,3%, 5,9%, 8,3%	0,83	1,12

Как следует из Табл. 5.8, наилучшее выравнивание из всех шести вариантов ПДЛ имеет ПДЛ с компоновкой (4,8%, 4,3%, 5,9%, 8,3%), немного хуже выравнивает ПДЛ постоянной перфорации 4,1%. На Рис. 5.11, Рис. 5.12 представлены распределения паросодержания и скоростей пара в объеме модели для этих двух случаев:

- 1) ПДЛ с равномерной перфорацией 4,1 %;
- 2) ПДЛ из 4-х листов с перфорацией 4,8%, 4,3%, 5,9%, 8,3%.

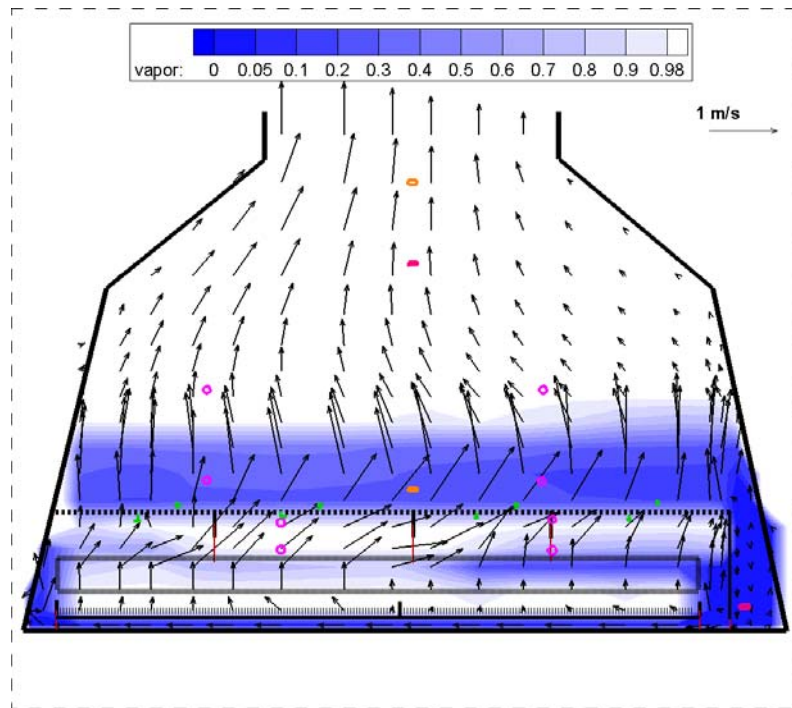


Рис. 5.11 – Распределение скорости пара и паросодержания  
(ПДЛ с равномерной перфорацией (4,1%))

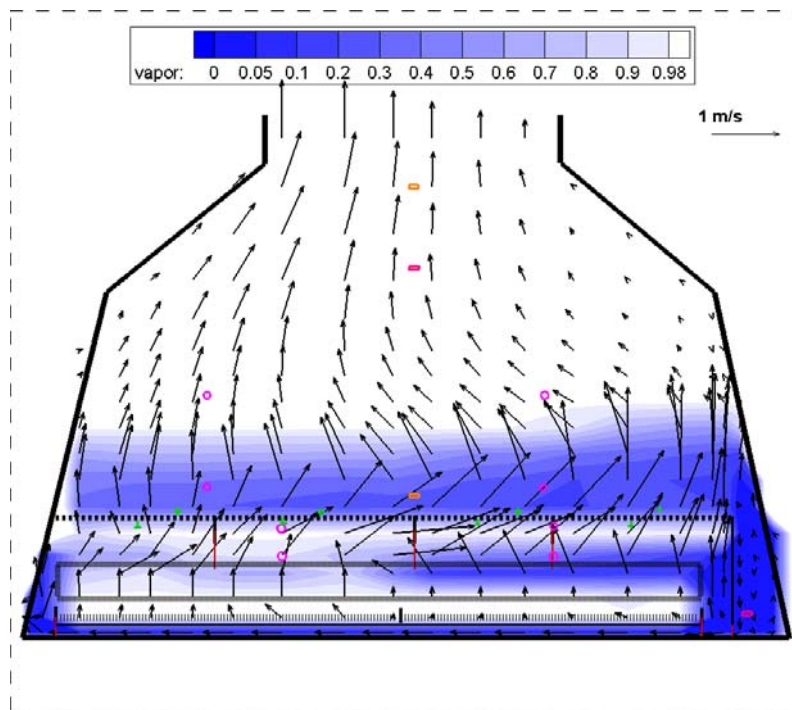


Рис. 5.12 – Распределение скорости пара и паросодержания  
(ПДЛ ПДЛ из 4-х листов 4,8%, 4,3%, 5,9%, 8,3%)

Расчетный анализ экспериментов с помощью усовершенствованной версии кода STEG позволил получить новую важную информацию по закономерностям выравнивания паровой нагрузки:

1. Установлено, что переход с равномерной перфорации на неравномерную, **с одной стороны**, обеспечивает лучшее интегральное выравнивание (суммарный расход с горячей половины примерно равен суммарному расходу с холодной половины), **но с другой стороны**, при этом **ухудшается сепарация пара** из-за высоких локальных значений скорости пара вблизи границы смыкания пластин с разной степенью перфорации.

2. Расчетным анализом показана возможность улучшения выравнивающего эффекта ПДЛ при использовании листов с различной перфорацией.

### 5.3 Демонстрация применения усовершенствованного кода STEG для исследования выравнивающей способности ПДЛ в натурном парогенераторе

Для применения усовершенствованного кода STEG для расчетов теплогидравлики натурного парогенератора и определения остаточной неравномерности расхода пара на зеркале испарения, необходима разработка соответствующего файла входных данных для натурного парогенератора с учетом его особенностей и результатов выполненной валидации кода STEG на опытных данных экспериментов на стенде ПГВ. Эта работа должна выполняться совместно с Главным конструктором ВВЭР АО ОКБ "ГИДРОПРЕСС" и является предметом отдельного большого исследования. В настоящем разделе, в целях демонстрации возможностей усовершенствованного кода STEG для подобных задач, приводятся результаты двух расчетов (один – для ПДЛ с равномерной перфорацией

7,8%, второй – для ПДЛ с неравномерной перфорацией). 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 [5]. Была использована ранее разработанная нодализация схема, использовавшаяся в [119, 120, 121].

### 5.3.1 Параметры для расчетов теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе ПГВ-1000М в номинальном режиме для ПДЛ с равномерной и неравномерной перфорацией

Было выполнено моделирование теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе ПГВ-1000М в номинальном режиме работы.

В таблице 5.9 приводятся основные геометрические и теплотехнические данные ПГВ-1000М, принятые в расчете.

Табл. 5.9 – Геометрические и теплотехнические параметры ПГВ-1000М, принятые в расчете STEG

Параметр	Величина
Тепловая мощность	753 МВт
Паропроизводительность	408 кг/с
Рабочее давление пара	6,27 МПа

Параметр	Величина
Температура пара на выходе	278,5 °С (551,5 К)
Температура питательной воды	220 °С (493 К)
Расход теплоносителя (I контур)	4464 кг/с
Температура теплоносителя (I контур):	
На входе	322 °С (595 К)
На выходе	290 °С (563 К)
Давление теплоносителя (I контур)	16 МПа
Поверхность теплообмена	6115 м <sup>2</sup>
Число труб теплоносителя	11500
Диаметр и толщина стенок труб	16x1,5 мм
Шаг разбивки труб (поперечный, продольный), тип решетки – шахматный	23x19 мм
Внутренний диаметр корпуса	4,0 м
Максимальная длина ПГ	14,53 м
Внутренний диаметр коллекторов	0,834 м
Ширина центрального и периферийного пакета ПГ труб	0,667 м
Ширина центрального коридора	0,211 м
Ширина коридора между центральным и периферийным пакетами	0,223 м
Количество поперечных рядов труб:	
Пакет 1 (центральный)	110

Параметр	Величина
Пакет 2 (периферийный)	79
Количество вертикальных рядов труб:	
Пакет 1 (центральный)	59
Пакет 2 (периферийный)	59
Высота расположения ПДЛ	2,45 м
Коэффициент перфорации ПДЛ	0,078
Расстояние от нижней отметки до начала 1-го пакета	0,108 м
Высота 1-го пакета (максимальная по габаритам пакета)	2,087 м
Поперечное расстояние от внешнего края второго пакета до закраины ПДЛ	0,130 м
Высота закраины	0,78 м
Нижняя отметка решеток	0,03 м
Верхняя отметка решеток	2,19 м
Нижняя отметка перегородок (продольных и поперечных)	2,29 м
Верхняя отметка перегородок	2,43 м

Расчетная область разбивалась, соответственно по ширине, длине, высоте, на 22 x 32 x 22 контрольных объема (Рис. 5.13 – Рис. 5.14). Выбор расчетной сетки определялся, главным образом, конструктивными особенностями ПГ. Коридоры по ширине разбивались на два контрольных объема. Разбиение расчетной области на контрольные объемы по длине ПГ

определялось, главным образом, расположением дистанционирующих решеток. Распределение теплового потока в объеме парогенератора со стороны первого контура задавалось на основе данных, ранее предоставленных АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

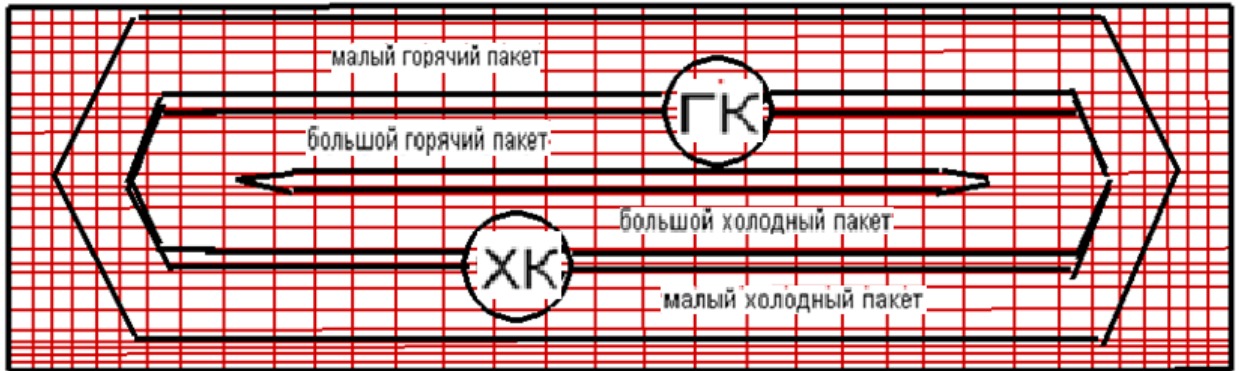


Рис. 5.13 – Расчетная сетка в продольном сечении ПГВ-1000М

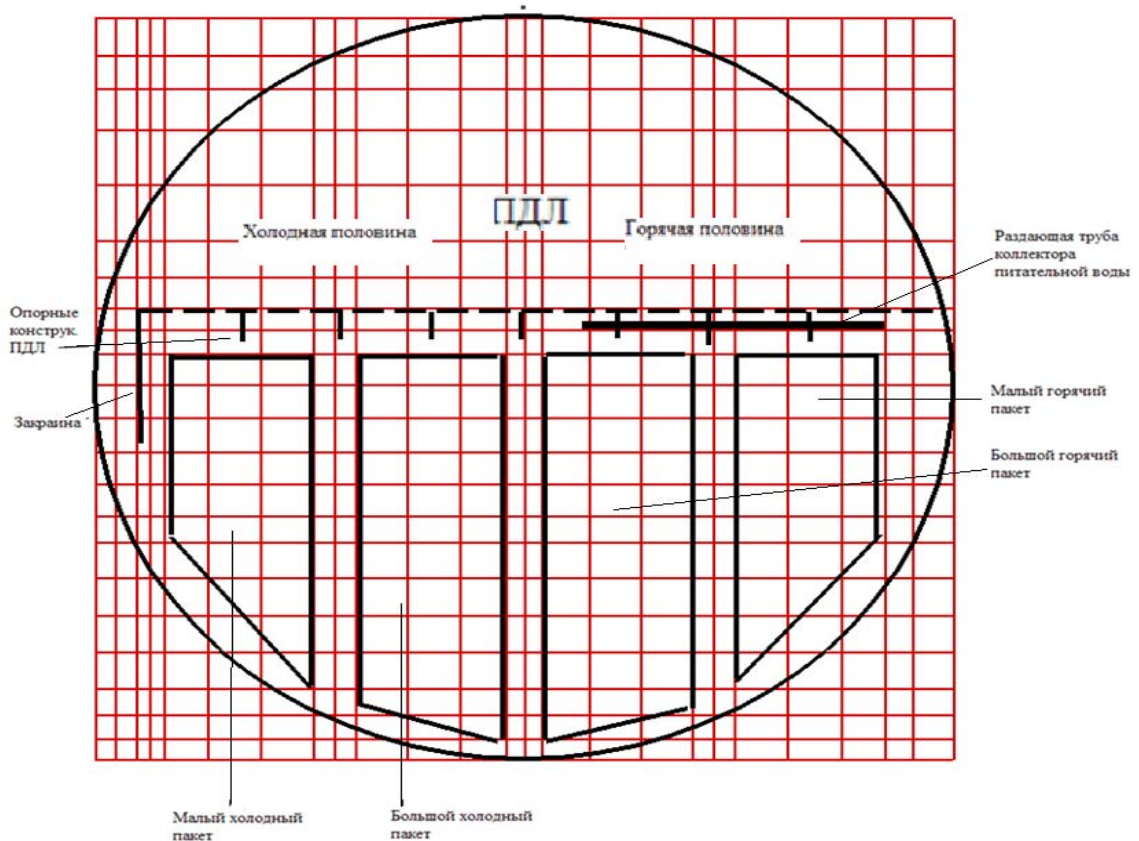


Рис. 5.14 – Расчетная сетка в поперечном сечении ПГВ-1000М

### 5.3.2 Результаты расчетов теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе ПГВ-1000М в номинальном режиме для ПДЛ с равномерной и неравномерной перфорацией

Был выполнен расчет для ПДЛ равномерной перфорации 7,8%. Для задания листов различной перфорации для проведения расчета с неравномерной перфорацией использовались данные, приведенные в [47] для расчета ПГВ-1500, которые были специально промасштабированы для расчета ПГВ-1000М следующим образом.

На рис. 5.15 представлено расположение зон ПДЛ с различной степенью перфорации в ПГВ-1500 [47]:

1. Зона 1: 5%
2. Зона 2: 7%
3. Зона 3: 9%
4. Зона 4: 6,5%

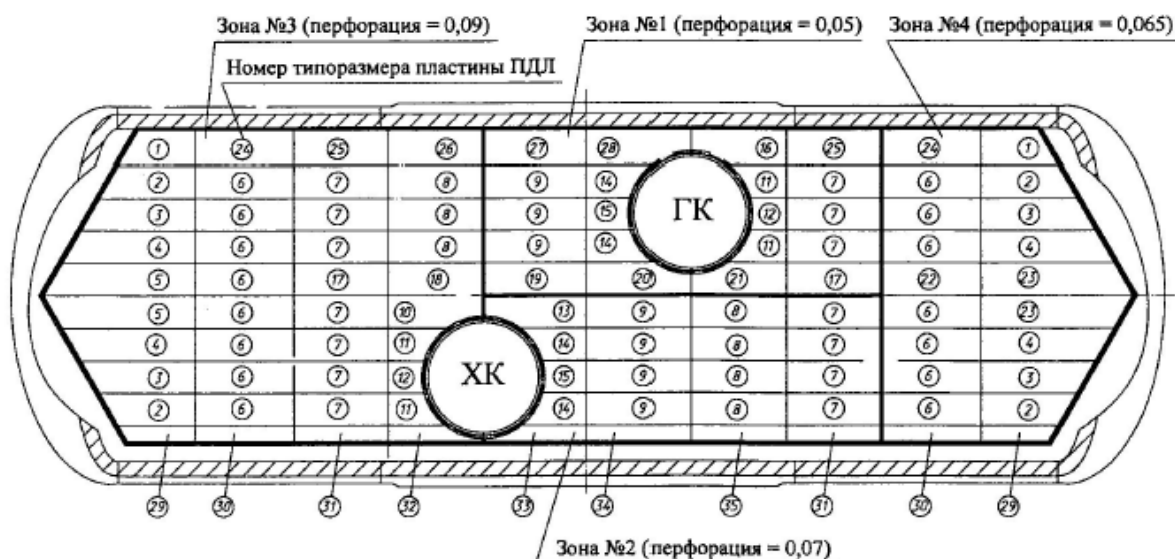


Рис. 5.15 – Расположение зон с различной степенью перфорации ПДЛ в варианте ПГВ-1500 [47]



В базовом варианте ПГВ-1000М ПДЛ с равномерной перфорацией имеет степень перфорации 7,8%. Степени перфорации в соответствующих зонах ПДЛ ПГВ-1000М распределены пропорционально степени перфорации зон в ПГВ-1500 (Рис. 5.15) и таким образом, что средняя по площади ПДЛ степень перфорации составляет 7,8%. Соответственно, степени перфорации данного варианта ПДЛ в ПГВ-1000М, которые были использованы в расчете, составляют (см. Рис. 5.16):

1. Зона 1: 5,3%
2. Зона 2: 7,4%
3. Зона 3: 9,5%
4. Зона 4: 6,9%

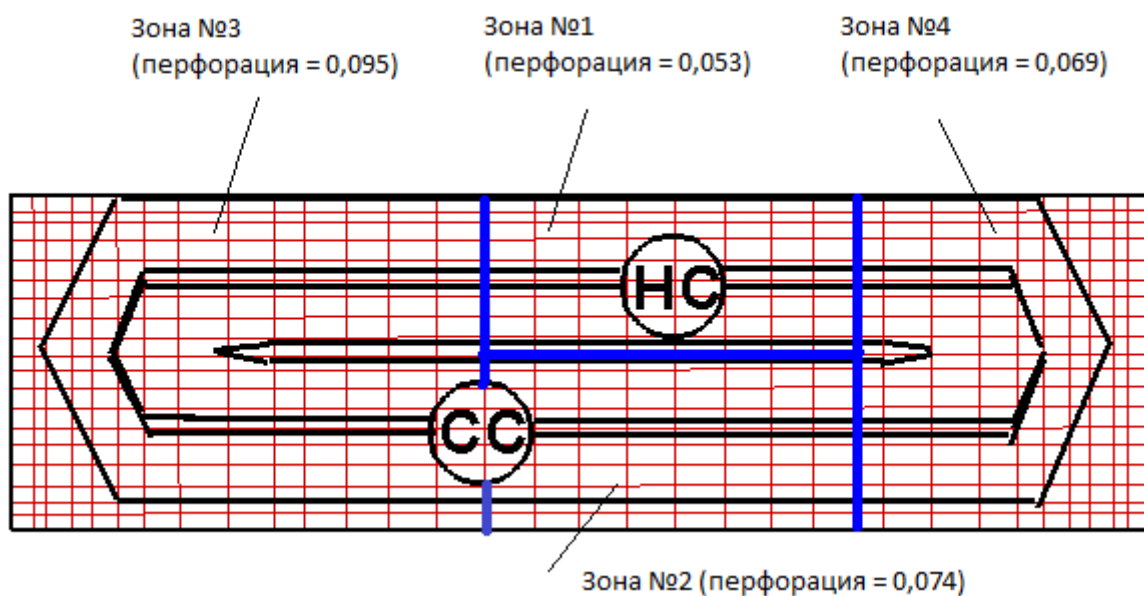


Рис. 5.16 – Расположение расчетных зон ПДЛ ПГВ-1000М

На основании выше изложенной информации были выполнены два расчета: 1) с ПДЛ с равномерной перфорацией 7,8% и 2) с ПДЛ переменной перфорации (см. Рис 5.16). Их результаты излагаются ниже.

Как отмечалось выше, остаточную неравномерность паровой нагрузки характеризует приведенная скорость пара после ПДЛ. Приведенная скорость пара на выходе из ПДЛ была усреднена по каждой отдельной зоне. На Рис. 5.17 показаны получившиеся значения средней приведенной скорости в каждой зоне для ПДЛ равномерной перфорации 7,8% и ПДЛ переменной перфорации.

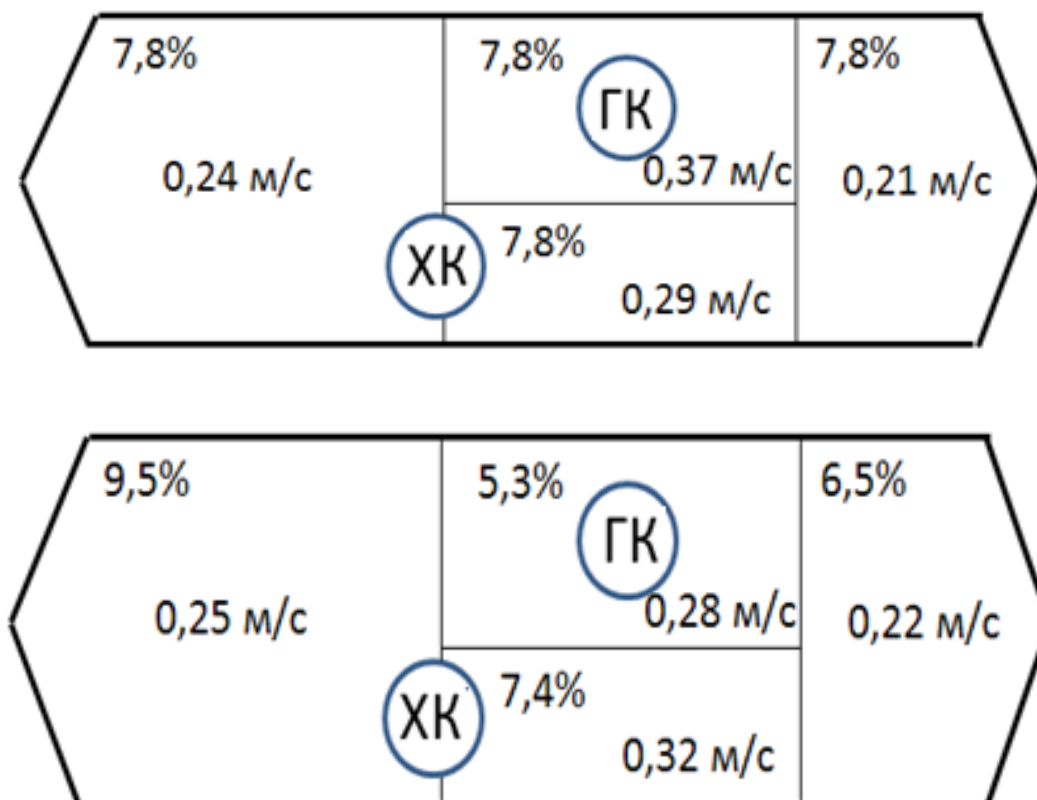


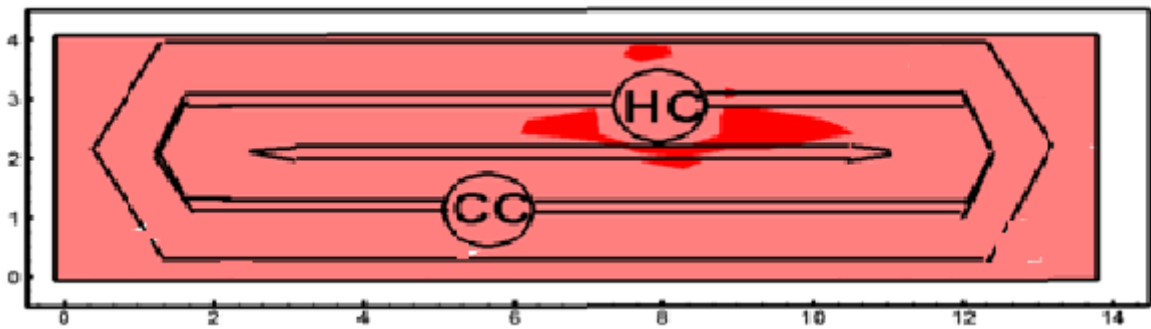
Рис. 5.17 – Средняя приведенная скорость по зонам для ПДЛ равномерной перфорации 7,8% и ПДЛ переменной перфорацией

Из Рис. 5.17 следует, что использование ПДЛ переменной перфорации в среднем улучшает выравнивание паровой нагрузки, как это ранее было установлено при анализе экспериментов на стенде ПГВ.

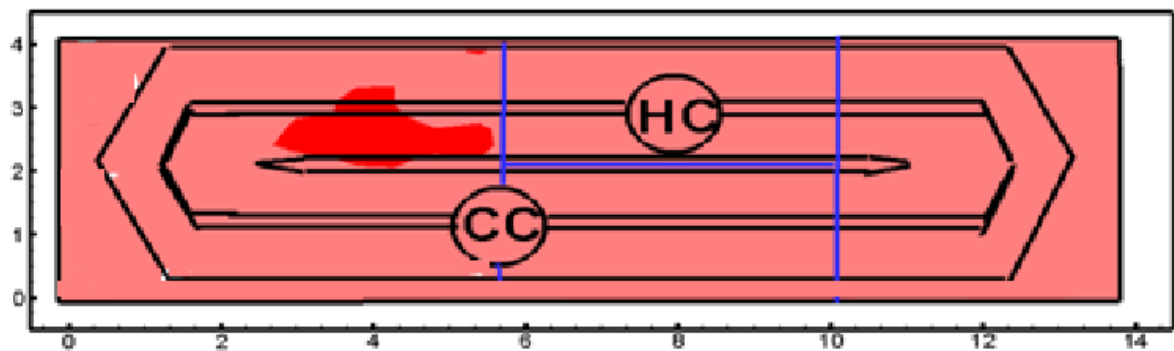
Однако при анализе локальной приведенной скорости пара по сечению ПДЛ ситуация существенно меняется [122]. Для целей качественного анализа

влияния переменности ПДЛ на его выравнивающую способность будем выделять область повышенной паровой нагрузки на выходе из ПДЛ. Если эта область достаточно протяженная, то ПДЛ выравнивает паровую нагрузку недостаточно. Эту область будем определять с помощью некоторого значения приведенной скорости пара, которое будем считать как граничное с точки зрения гравитационной сепарации. Поскольку сейчас выполняется, по существу, демонстрация возможностей использования усовершенствованного кода STEG для расчетов подобного рода, то точная величина такой скорости не имеет существенного значения. Примем, в качестве подобного значения граничной скорости величину 0,4 м/с.

На Рис. 5.18 показаны распределения приведенной скорости пара по ПДЛ для ПДЛ равномерной перфорации и ПДЛ переменной перфорации. На Рис. 5.18 на фоне розового цвета выделены ярко-красным цветом области, в которых приведенная скорость больше 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. 5.17, а сдвигается в сторону холодного торца (зона №3). Этот сдвиг обусловлен сложными двухфазными гидродинамическими течениями, обусловленными как неравномерностью подвода пара из области трубчатки, 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.



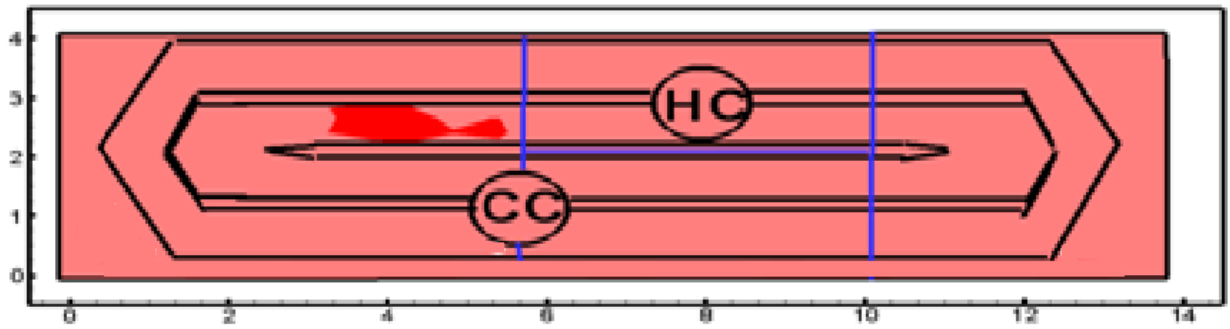
а)



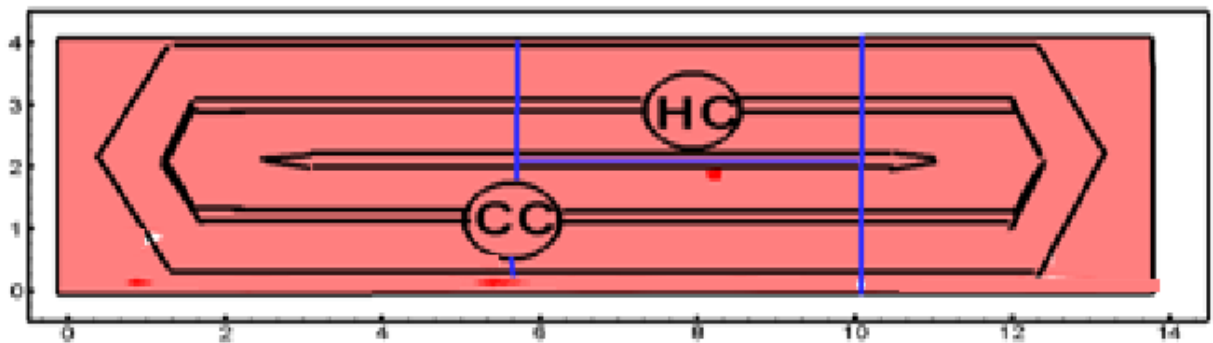
б)

Рис. 5.18 – Области повышенной паровой нагрузки на ПДЛ (выделены ярко-красным цветом) а) ПДЛ с равномерной перфорацией, б) ПДЛ с неравномерной перфорацией

В методических целях были выполнены два дополнительных расчета, в которых степень перфорации ПДЛ в зоне №3 была сначала уменьшена до 8,5%, а затем и до 7,5%. Остальные параметры не менялись. Результаты этих расчетов представлены на Рис. 5.19.



а)



б)

Рис. 5.19 – Области повышенной паровой нагрузки на ПДЛ (выделены ярко-красным цветом) для ПДЛ переменной перфорации с уменьшением степени перфорации в зоне у холодного торца: а) Зона 3 – 8,5%, б) Зона 3 – 7,5%

Из Рис. 5.19 следует, что при 8,5% степени перфорации зоны №3 зона повышенной паровой нагрузки уменьшилась по сравнению со случаем 9,5% степени перфорации, а при 7,5% – она практически исчезла, что свидетельствует об улучшении сепарации пара.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Проведена валидация усовершенствованной версии кода STEG на экспериментальных данных стенда ПГВ, показавшая приемлемое совпадение опытных и расчетных данных.

2. Выполнен анализ экспериментов по выравнивающей способности ПДЛ с помощью усовершенствованной версии кода STEG, который позволил получить дополнительную информацию по закономерностям выравнивания паровой нагрузки.

2.1 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.

2.2 Выполнены демонстрационные расчеты натурального парогенератора с ПДЛ переменной перфорации, которые также подтвердили выводы, представленные в п.2.1.

2.3 Расчетным анализом показана возможность улучшения выравнивающего эффекта ПДЛ при использовании листов с различной перфорацией.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выполненной диссертационной работы:

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 ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Трунов Н.Б., Лукасевич Б.И., Сотсков В.В., Харченко С.А. Прошлое и будущее горизонтальных парогенераторов // Вопросы атомной науки и техники. Серия "Обеспечение безопасности АЭС". – 2007. – Вып. 17 – С. 15-34
2. Кружилин Г.Н. Теория уноса и сепарации влаги в паровых котлах // Советское котлотурбостроение, 1945, №1, 4
3. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций // М.: Энергоатомиздат, 1987, 384 с
4. Федоров Л.Ф., Титов В.Ф., Рассохин Н.Г. Парогенераторы атомных электростанций // М.: Энергоатомиздат, 1992, 416 с
5. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР // М.: Энергоатомиздат, 2001, 318 с
6. Лукасевич Б.И., Трунов Н.Б., Драгунов Ю.Г., Давиденко С.Е. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций // М.: ИКЦ Академкнига, 2004 - 394 с
7. Агеев А.Г., Карасев В.Б., Серов И.Т., Титов В.Ф. Сепарационные устройства АЭС. // М.: Энергоиздат, 1982, 169 с
8. Агеев А.Г., Дубровский И.С., Целищев П.А. Экспериментальное исследование элементов сепарационной схемы парогенератора ПГВ-1000» // отчет ЭНИН №113, 1971, 90 с
9. Стырикович М.А., Мартынова О.И., Миропольский З.Л. Процессы генерации пара на электростанциях // Энергия, 1969

10. Дубровский И.С., Агеев А.Г. Гидродинамика погруженных дырчатых щитов // Теплоэнергетика, 1974, №8. с. 62-64
11. Стырикович М.А., Сурнов А.В. Относительно некоторых зависимостей для переходной области динамического двухфазного слоя // Теплоэнергетика, 1962, №4
12. Дементьев Б.А., Лепилин Р.С., Логинов А.А. Исследование гидродинамики водяного объема в условиях больших высот барботажного слоя // НДВШ. Энергетика, 1959, №2
13. Рябов Г.А., Козлов Ю.В. Экспериментальное исследование гидродинамики погруженных дырчатых листов // Теплоэнергетика, 1984, №8, с.62–65
14. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидравлика газожидкостных систем // Госэнергоиздат, 1958, 232 с
15. Маргулова Т.Х. Расчет и проектирование парогенераторов атомных электростанций // Госэнергоиздат, 1960, 142 с
16. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании // Высшая школа, 1977, 352 с
17. Рябов Г.А., Карасев В.Б., Козлов Ю.В. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления дырчатых листов на пароводяной смеси// Теплоэнергетика , №6, 1984, с. 68-70
18. Алферов Н.С., Шульженко Е.Н. Гидравлические потери в местных сопротивлениях при течении двухфазных смесей // Тр. ЦКТИ, 1976, № 139, с.49

19. Чермак, Джича, Лайтнер Гидравлическое сопротивление толстых дроссельных шайб, установленных в вертикальных трубах, двухфазному потоку // Теплопередача, 1964, №2
20. Гейгер, Рорер Потери в двухфазном потоке при резком сужении канала // Теплопередача, 1966, №1
21. Мочан С.И. Местные сопротивления при движении двухфазных смесей // Вопросы теплопередачи и гидравлики двухфазных сред, ГЭИ, 1961
22. Фокин Б.С., Гольдберг Е.И. Нестационарные процессы и вибрационные явления при движении двухфазных потоков в местных сопротивлениях // Кризисы теплообмена и околокритическая область, Наука, 1977, с. 126–142
23. Крамеров А.Я., Шевелев Я.В. Инженерные расчеты ядерных реакторов // Атомиздат, 1964, 715 с
24. Панасенко М.Д., Козлов Ю.В. Исследование гидродинамики водяного объема и операционных характеристик парового объема при барботаже // Теплоэнергетика, 1963, №1, с. 46–52
25. Идельчик И.Е. Учет влияния вязкости на гидравлическое сопротивление диафрагм и решеток // Теплоэнергетика, 1960, №9, с.75–80
26. Васильева Р.В., Дубровский И.С., Агеев А.Г., Карасев В.Б., Сакович Е.В., Байнякшин В.Д. Гидродинамика погруженных дырчатых щитов парогенераторов АЭС // Электрические станции, 1986, №8, с. 12-15
27. Агеев А.Г., Васильева Р.В., Дмитриев А.И., Таранков Г.А., Титов В.Ф. Исследование гидродинамики парогенератора ПГВ-1000 // Электрические станции, 1987, №6, с.19–23

28. Боришанский В.М., Андреевский А.А., Быков Г.С., Волухова Т.Г., Шлейфер В.А., Беленький М.Я. К расчету гидравлики местных сопротивлений на двухфазном потоке // Тр. ЦКТИ, 139, 1976 г, с. 35 – 48
29. Федоткин И.М. Гидравлическое сопротивление дроссельных диафрагм двухфазному потоку // Известия ВУЗов. Энергетика, 1967, №4, с.77-83
30. Янссен Э. Потери давления в двухфазном пароводяном потоке при течении через резкие сужения и расширения в области давлений 42–98 АТА // Достижения в области теплообмена, 1970, с. 147–169
31. Hirt C.W., Volume of Fluid Method for the Dynamics of Free Boundaries // Journal of Computational Physics 39, 1981, p. 201-225
32. Гуцев Д.Ф., Козлов Ю.В., Некрасов А.В., Титов В.Ф., Соловьев Ю.А., Таранков Г.А. Особенности гидродинамики парогенератора ПГВ-1000 без погруженного дырчатого листа // Теплоэнергетика, №8, 1988, с. 44–48
33. Таранков Г.А., Титов В.Ф., Логвинов С.А. и др. Исследования парогенераторов головного блока АЭС с ВВЭР // Энергомашиностроение, 1986, №5, с. 30–32
34. Свистунов Е.П., Таранков Г.А. Влияние конструкции ПДЛ на парораспределение // Энергомашиностроение, 1987, №1, с. 15-19
35. Сааков Э.С., Свистунов Е.П., Пикус В.Ю., Некрасов А.В., Севастьянов В.П., Мухачев В.Л., Таранков Г.А., Молчанов В.П. Исследование выравнивающей способности погруженного дырчатого листа парогенератора ПГВ-1000 // Теплоэнергетика, №7, 1992, с.50–55
36. Идельчик И.Е. Аэродинамика промышленных аппаратов // Энергия, М.-Л., 1964

37. Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов // Машиностроение, 1983, 351 с.
38. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. // Машиностроение, 1992. – 672 с
39. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства и водяного пара. – М.: Энергия, 1980. – 424 с
40. Методические указания. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. РД 24.035.05-89. – Ленинград: Министерство тяжелого, энергетического и транспортного строения СССР. 1991. – 211 с
41. Агеев А.Г., Карасев В.Б., Серов И.Т., Титов В.Ф. Сепарационные устройства АЭС. – М.: Энергоиздат, 1982. –169 с
42. Гидродинамика парогенераторов ПГВ-1000 5-го блока Нововоронежской АЭС (Банк опытных данных). – Электрогорск: ЭНИЦ, 1994 – 73 с
43. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – Госэнергоиздат, 1960
44. Отчет ОКБ «Гидропресс» «Определение предельной по влажности пара нагрузки серийных ПГВ-1000 на модели при натуральных параметрах. Исследование сепарации пара и гидродинамики на моделях внутрикорпусных устройств горизонтальных парогенераторов (заключительный 187-0-221)». Подольск. 1983
45. Экспериментальные исследования гидросопротивления и выравнивающей способности ПДЛ на стенде ПГВ. Отчет ОАО «ЭНИЦ»; руководитель работы О.И. Мелихов. Электрогорск, 2014 г. – 132 с

46. Лабунцов Д.А., Корнюхин И.П., Захарова Э.А. Паросодержание двухфазного адиабатного потока в вертикальных каналах // Теплоэнергетика, №4, 1968, С.62-67

47. Трунов Н.Б., Сотсков В.В., Агеев А.Г., Васильева Р.В. Приближенная методика расчета переменной перфорации погруженного дырчатого листа горизонтального парогенератора // Вопросы атомной науки и техники. Серия "Обеспечение безопасности АЭС". – 2006. – Вып. 15 – С. 89-99

48. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Урбан Т.В. Математическое моделирование теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе ПГВ-1000 // Теплоэнергетика, №5, 2002, с.70-74

49. Мелихов В.И. Моделирование нестационарных теплогидравлических процессов на АЭС с ВВЭР. // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук.– Москва: МЭИ (ТУ). 2004. 576 с

50. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В. Математическое моделирование теплогидравлических процессов в парогенераторе с помощью кода STEG // Новое в российской энергетике, №8, 2008, с.21-33

51. Неровнов А.А., Разработка и валидация математической модели пространственного течения двухфазной пароводяной среды в объеме парогенератора // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва: МЭИ (ТУ).2012. 195 с

52. Nigmatulin BI, Melikhov OI, Khodjaev ID (April 3-7, 1995) Investigation of entrainment in a dispersed-annular gas-liquid flow, Proc. of The 2bd International Conference on Multiphase Flow '95 Kyoto, Japan, vol 3 pp P4-33 to P4-37

53. Liles D.R., Reed W.H. A semi-implicit method for two-phase fluid dynamics // *Journal of computational physics*, 1978, v.26, P.390-407
54. Melikhov V.I., Melikhov O.I., Urban T.V. Thermal-Hydraulic Analysis of Horizontal Steam Generator PGV-1000 with STEG Code // *Annual Meeting on Nuclear Technology 2002*. 14-16 May 2002. Kerntechnische Gesellschaft Stuttgart Deutsches Atomforum, p.121-124
55. Trunov N.B., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Parfenov I.V. Analysis of Thermal Hydraulics and Soluble Impurity Distribution in Horizontal Steam Generator PGV-1000 with STEG Code // *Proceedings of the Eleventh International Conference on Nuclear Engineering, ICONE-11*, ICONE11-36156, 2003
56. Мелихов В.И., Трунов Н.Б., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В. Анализ теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе с помощью кода STEG // *7-й Международный семинар по горизонтальным парогенераторам. Сборник тезисов докладов – Подольск, 2006*, с.72-73
57. Parfenov I.V, Melikhov V.I., Melikhov O.I., Elkin I.V. Thermal-Hydraulic studies of the steam separation in horizontal steam generator at PGV test facility // *Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering, Belgium*. ICONE17-75276, 2009
58. TRAC PF1/MOD2: Theory Manual Los Alamos National Laboratory. November 1990. Los Alamos. NM 87545
59. Simovic Z.R., Ocokoljic S., Stefanovic V.D. “Interfacial friction correlations for the two-phase flow across tube bundles”, *International Journal of Multiphase Flow* 33 (2007) 217-226
60. TRACE V5.0. Theory Manual. Field Equations, Solution methods and Physical models. U.S. Nuclear Regulation Commission, 2007, Washington, 696 P

61. Экспериментальные исследования гидросопротивления и выравнивающей способности ПДЛ на стенде ПГВ. Отчет ОАО «ЭНИЦ»; руководитель работы О.И. Мелихов. Электрогорск, 2014 г. – 132 с
62. Lockhart R.W., Martinelli R.C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes // Chem. Engng Progr., 1949, V.45, №1, P. 39–48
63. Freidel L. Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow // European Two-Phase Flow Group Meeting. Ispra, Italy. June 1979. Paper E2
64. Muller-Steinhagen H., Heck K. A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow pipes // Chem. Engng Progr., 1986, V.20, P.297–308
65. 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
66. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. // М.: Наука, 1987
67. Делайе Дж., Гио М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика в атомной и тепловой энергетике. // М.: Энергоатомиздат, 1984
68. Кузнецов Ю.Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. // М.: Энергоатомиздат, 1989, 296 с
69. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Соловьев С.Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках: учебное пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. // М.: Издательство МЭИ, 2003. – 548 с



70. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Теплообмен в ядерных энергетических установках. Учебное пособие для вузов; 2-е изд., перераб. // М. : ИздАт, 2008. – 256 с
71. RELAP5/MOD3. Code Manual // NUREG/CR-5535, INEL-95/0174, Vol.1-5, 1997
72. Bengaouer A., Bestion D. CATHARE 2 V1.3. User's guide lines // Equipe CATHARE Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble, STR/LML/EM/94-266, 1995
73. Lerchl G., Austregesilo H. ATHLET Mod 1.2 Cycle D. User's Manual. GRS P 1/V.1, September 2001
74. Верификация комплекса программ теплогидравлических расчетов нестационарных режимов ЯЭУ с ВВЭР «ТРАП-97». // Отчет ОКБ «Гидропресс», 1998. ДЭ-108
75. Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Юдов Ю.В., Данилов И.Г., Коротаев В.Г., Кутьин В.В., Бондарчик Б.Р., Бенедиктов Д.В. КОРСАР – теплогидравлический расчетный код нового поколения для обоснования безопасности АЭС с ВВЭР. // Теплоэнергетика. 2001, №9, с. 36 – 43
76. Василенко В.А., Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Юдов Ю.В., Данилов И.Г., Коротаев В.Г., Кутьин В.В., Бондарчик Б.Р., Бенедиктов Д.В. Опыт создания и основные характеристики теплогидравлического расчетного кода нового поколения КОРСАР. // Теплоэнергетика, 2002, №11, с.11-16
77. Юдов Ю.В. Двухжидкостная модель нестационарной контурной теплогидравлики и ее численная реализация в расчетном коде КОРСАР. // Теплоэнергетика, 2002, №11, с.17-21

78. Юдов Ю.В., Волкова С.Н., Мигров Ю.А. Замыкающие соотношения теплогидравлической модели расчетного кода КОРСАР. // Теплоэнергетика, 2002, №11, с.22-29
79. Веселовский А.Н., Животягин А.Ф., Крошилин А.Е., Крошилин В.Е. Анализ пространственных течений неравновесных двухфазных смесей. // Теплоэнергетика, 1995, №5, с. 26-31
80. Веселовский А.Н., Животягин А.Ф., Калиниченко С.Д., Крошилин А.Е., Крошилин В.Е. Комплекс программ БАГИРА для моделирования теплогидродинамики многофазных сред. // Теплоэнергетика, 1998, №5, с. 11-16
81. Wu Q., Kim S., Ishii M., Beus S.G. One-group interfacial area transport in vertical bubbly flow // Int. J. Heat Mass Transfer 1998 Vol.41 P.1103–1112
82. Emonot P., Souyri A., Gandrille J.L., Barre F. CATHARE-3: A new system code for thermal-hydraulics in the context of the NEPTUNE project // The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13), Kanazawa City, Ishikawa Prefecture, Japan, September 27 – October 2, 2009, N13P1125
83. Fu X.Y., Interfacial area measurement and transport modeling in air–water two-phase flow // Ph.D. Thesis, School of Nuclear Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, 2001
84. Hibiki T., Ishii M., One-group interfacial area transport of bubbly flows in vertical round tubes // Int. J. Heat Mass Transfer 43, 2711–2726, 2000
85. Hibiki T., Ishii M., Two-group interfacial area transport equations at bubbly-to-slug flow transition // Nuclear Engineering Design 202, 39-76, 2000

86. Ishii M., Kim S., Uhle J., Interfacial area transport equation: model development and benchmark experiments // *Int. J. Heat Mass Transfer* 45, 3111–3123, 2002
87. Kocamustafaogullari G., Ishii M., Foundation of the interfacial area transport equation and its closure relations // *Int. J. Heat Mass Transfer* 38, 481–493, 1995
88. Prince M.J., Blanch H.W., Bubble coalescence and break-up in air-sparged bubble columns // *AIChE J.* 36, 1485–1497, 1990
89. Coualaloglou C.A., Tavlarides L.L., Drop size distributions and coalescence frequencies of liquid-liquid dispersion in flow vessels // *AIChE J.* 22, 289–297, 1976
90. Oolman T.O., Blanch H.W., Bubble coalescence in stagnant liquids // *Chemical Engineering Communications* 43, 237–261, 1986
91. Kirkpatrick R.D., Lockett M.J., The influence of approach velocity on bubble coalescence // *Chemical Engineering Communications* 29, 2363–2373, 1974
92. Rotta J.C., *Turbulence Stromungen*, Teubner B.G., Stuttgart, Germany, 1972
93. Loeb L.B., *The kinetic theory of gases*, Dover, New York, 1927
94. Hinze J.W., *Turbulence*, McGraw-Hill, New York, 1959
95. Levich V.G., *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, 1962
96. Kim W., Lee K., Coalescence Behavior of two bubbles in stagnant liquids // *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 20, 449–453, 1987

97. Otake T., Tone S., Nakao K., Mitsuhashi Y., Coalescence and breakup of bubbles in liquids // *Chemical Engineering Science*, 32, 377–383, 1977
98. Bilicki A., Kestin J., Transition criteria for two-phase flow patterns in vertical upward flow // *International Journal of Multiphase Flow*, 13, 283–294, 1987
99. Stewart C.W., Bubble interaction in low-viscosity liquids // *International Journal of Multiphase Flow*, 21, 1037–1046, 1995
100. Schlichting H., *Boundary layer theory*, McGraw-Hill book Co., 1979
101. Tsuchiya K., Miyahara T., Fan L.S., Visualization of bubble-wake interactions for a stream of bubbles in a two-dimensional liquid-solid fluidized bed // *International Journal of Multiphase Flow*, 15, 35–49, 1989
102. Sevik M., Park S.H., The splitting of drops and bubbles by turbulent fluid flow // *Journal of Fluids Engineering*, 95, 53–60, 1973
103. Azbel D., Athanasios I.L., A mechanism of liquid entrainment // *Handbook of fluids in motion*, Ann arbor Sci.Pub., Ann Arbor, MI, 1983
104. Azbel D., *Two-phase flows in chemical engineering*, Cambridge University press, Cambridge, UK, 1981
105. Bello J.K., Turbulent flow in channel with parallel walls // Mir, in Russian, Moskva, 1968
106. Ishii M., Hibiki T., *Thermo-fluid dynamics of two-phase flow* // Springer Science and Business Media, 2006, 462 pages
107. Kataoka I., Ishii M. Mechanism and Correlation of Droplet Entrainment and Deposition in Annular Two-phase Flow // Argonne National Laboratory report ANL-82-44 (NUREG/CR-2885), 1982

108. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения // М.: Издательство «Мир», 1972. – 440
109. Ishii M., Chawla T.C., Local Drag Laws in Dispersed Two-Phase Flow // Argonne National Laboratory report ANL-79-105 (NUREG/CR-1230) (December 1979)
110. Kataoka I, Ishii M., Mishima K. Generation and size distribution of droplets in annular two-phase flow // J. Fluids Eng. 1983. Vol. 105 №2. P. 230-238
111. Ishii M., Kim S. and Uhle J., Interfacial Area Transport: Data and Models // OECD/CSNI Workshop on Advanced Thermal-Hydraulics and Neutronics Codes: Current and Future Applications, April 10-13, 2000, Barcelona, Spain (2000)
112. Talley J.D., Kim S., Mahaffy J. Implementation and evaluation of one-group interfacial area transport equation in TRACE – Nuclear Engineering and Design, 241, 2011 P.865-873
113. Колбасников А.В., Шварц А.Л., Галецкий Н.С.. Исследование гидродинамики пароводяной среды в межтрубном пространстве поверхностей нагрева с целью усовершенствования парогенераторов АЭС с ВВЭР // Электрические станции, 1991, №8
114. Колбасников А.В., Шварц А.Л., Галецкий Н.С. “Исследование гидродинамики двухфазной среды в свободно погруженных поверхностях нагрева применительно к парогенераторам АЭС ”, Теплоэнергетика, №4, 2000, стр.62 –66
115. Churchill S.W. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes // Chemical Engineering, Nov.7, 1977, pp.91–92

116. Андреевский А.А., Боришанский В.М. Состояние и перспективы проектирования парогенераторов АЭС с водо-водяными реакторами // тр. ЦКТИ, вып.108, 1971
117. Dmitriev A., Islamov R., Korotin V., Petrov D. Probabilistic Risk Assessment – Uncertainty Analysis. Report for US NRC. IBRAE RAS, 2003
118. Исламов Р.Т., Дядюра С.С., Аржаев К.А., Филиппов А.С., Артемьева М.М. Сравнение двух методов определения дефектов технических систем // Атомная Энергия. 2011. Т. 110. Вып. 6. С. 303-307
119. Мелихов О.И., Трунов Н.Б., Мелихов В.И., Парфенов Ю.В. Верификация программного комплекса STEG на основе теплогидравлического расчета номинального режима работы ПГВ-1000 М // 6-й Международный семинар по горизонтальным парогенераторам, Подольск. – 22–24 марта 2004 г. – Доклады на CD.
120. Трунов Н.Б., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В. Расчетно-теоретический анализ распределения теплогидравлических параметров и концентрации растворенных примесей в горизонтальном парогенераторе ПГВ-1000М с помощью кода STEG // Атомная энергия. – 2004. – Т. 96. Вып. 6 – С. 448-451.
121. Мелихов О.И., Мелихов В.И., Трунов Н.Б., Парфенов Ю.В. Анализ теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе с помощью кода STEG // 7-й Международный семинар по горизонтальным парогенераторам. – Подольск. – 3–5 октября 2006 г. – Сборник трудов на CD.
122. 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.