

На правах рукописи



СОМОВА  
Елена Владимировна

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО КОНСТРУКЦИИ  
СМЕШИВАЮЩЕГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ  
ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ  
НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Специальность:

05.14.14 – Тепловые электрические станции,  
их энергетические системы и агрегаты

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»)

Научный руководитель

*Шварц Анатолий Лазаревич* доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ

Официальные оппоненты:

*Корнеев Сергей Дмитриевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения Высшего профессионального образования «Московский государственный индустриальный университет» (ФГБОУ ВПО «МГИУ»)

*Григорук Дмитрий Геннадьевич* – кандидат физико-математических наук, заместитель начальника технического отдела по НИР и новым технологиям ОАО «Институт Теплоэлектропроект»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»)

Защита состоится « 19 » декабря 2013г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д.222.001.01 в ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ») по адресу: 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, 14.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ОАО «ВТИ».

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2013г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.222.001.01

доктор технических наук



П.А. Березинец

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Важным элементом тепловых схем перспективных энергоблоков на суперкритические параметры пара являются регенеративные подогреватели высокого давления (ПВД), нагревающие питательную воду для парогенераторов.

Одним из путей повышения эксплуатационной надежности этих блоков является замена поверхностных ПВД на смешивающие подогреватели высокого давления (СПВД). Нагрев питательной воды в них осуществляется в процессе контактного теплообмена питательной воды с греющей средой. В двухподъемной схеме СПВД устанавливаются перед питательным насосом второй ступени и уровень давлений в них составляет около 15 МПа.

СПВД может также использоваться для перспективных энергоблоков нового поколения с парогенератором, греющей средой в котором является свинец. Схема паросилового контура этого блока практически аналогична тепловой схеме блоков 300 МВт тепловых электрических станций. Основным отличием является включение после группы регенеративных ПВД дополнительного смешивающего подогревателя питательной воды высокого давления, который должен обеспечить догрев воды до 340°С во всех эксплуатационных и аварийных режимах работы блока. Надежность работы смешивающего подогревателя высокого давления в данной тепловой схеме имеет определяющее значение в связи с опасностью затвердевания свинца в межтрубном пространстве парогенератора.

До настоящего времени практически не проводились исследования контактного теплообмена, результаты которых позволили бы разработать конструкцию смешивающего подогревателя высокого давления, обеспечивающую надежную работу аппарата с достижением требуемых параметров на входе в парогенератор.

Большое число экспериментальных работ в этом направлении проводилось при давлении до 1 МПа. Полученные результаты использовались, в том числе, для совершенствования конструкции смешивающих ПВД. По-

сколькo термодинамические свойства сред при низком и высоких давлениях существенно различны, зависимости для расчета теплообмена при низком давлении нельзя использовать при высоком давлении.

В этой связи проведение экспериментальных исследований процесса конденсации пара на струях питательной воды при высоком давлении для расчетов и обоснования технических решений по конструкции СПВД является актуальной задачей.

### **Цель работы и направление исследований**

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование закономерностей теплообмена при конденсации пара на струях питательной воды при высоком давлении ~15 МПа необходимое для обоснования технических решений по конструкции элементов смешивающих подогревателей.

Для достижения этой цели были проведены:

- аналитический обзор конструкций ПВД с обоснованием использования СПВД, как одного из путей повышения надежности регенеративной системы подогрева питательной воды высокого давления для перспективных энергоблоков;
- экспериментальные исследования процесса теплообмена в СПВД;
- изучение влияния режимных и конструктивных факторов СПВД на процесс контактного теплообмена между пароводяной смесью и питательной водой при высоком давлении;
- апробация полученных зависимостей на опытной установке, моделирующей фрагмент тепловой схемы и конструкции СПВД перспективного энергоблока.

### **Достоверность результатов**

Обеспечивается применением современных вычислительных программных сред, использованием надежных методов вычислений при обработке результатов испытаний, утвержденных методик проведения испытаний и современных аттестованных измерительных приборов.

Подтверждается сходимостью закономерностей, полученных на стендовой и на опытной установках.

## **Научная новизна**

Обоснована возможность использования СПВД в системе подогрева питательной воды высокого давления перспективных энергоблоков.

Впервые проведено комплексное экспериментальное исследование контактного теплообмена при конденсации пара из пароводяной смеси на струях питательной воды при высоком давлении (~15 МПа).

Предложен механизм контактного теплообмена между пароводяной смесью и питательной водой при высоких давлениях в широком диапазоне режимных и конструктивных параметров. Выявлен неравновесный характер протекания такого процесса, получены характеризующие его зависимости.

## **Практическая значимость**

Предложены технические решения по конструкции смешивающего подогревателя высокого давления.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке смешивающих подогревателей питательной воды для двухподъемной тепловой схемы энергоблоков нового поколения, в том числе на суперкритические параметры пара, а также для тепловой схемы второго контура перспективных энергоустановок со свинцовым теплоносителем.

## **На защиту выносятся:**

- результаты экспериментальных исследований процесса теплообмена при высоком давлении в смешивающем подогревателе питательной воды;
- механизм процесса теплообмена при конденсации пара в потоке смешения пароводяной смеси и питательной воды при высоком давлении;
- расчетная зависимость относительного недогрева потока смешения от начальных параметров смешивающихся сред и конструктивных факторов СПВД, характеризующих эффективность протекания процесса теплообмена;
- разработанные технические решения по конструкции элементов смешивающего подогревателя высокого давления.

**Личный вклад автора** заключается в разработке схем измерений на стендовой и опытной установках, составлении программы испытаний, участии в экспериментальных исследованиях, обработке и анализе результатов, выработке практических рекомендаций.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

1. 2-м Конкурсе молодых специалистов ВТИ, г. Москва, 2003г.
2. 3-й Международной конференции "Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках", г. Москва, 21-23.09.2008г.
3. Конкурсе Российской Академии Наук "Новая генерация", г. Москва 2008г.
4. Заседаниях НТС ОАО "ВТИ", г. Москва 2008-2013 гг.
5. Конференции «Обеспечение комплексного технического перевооружения и сервиса генерирующего оборудования за счет применения инновационных решений», г. Санкт-Петербург, ОАО «Силовые машины», май 2013г.

### **Публикации**

По результатам выполненных исследований опубликовано 5 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и 2 доклада конференций.

### **Структура и объем**

Диссертация состоит из введения пяти глав, выводов, списка литературы, включающего 98 наименований, и 1 приложения. Содержит 139 страниц основного текста, 34 рисунка, 7 таблиц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, приводятся общие сведения об объекте исследования, определены задачи исследования и аннотированы основные положения работы.

**В первой главе** выполнен анализ конструкций и условий эксплуатации подогревателей питательной воды высокого давления и дается обзор работ по исследованию процессов в смешивающих подогревателях низкого давления.

Показано, что в настоящее время находят применение две конструкции ПВД: камерного типа с трубной доской и коллекторного типа с трубной системой, состоящей из змеевиков. Существующие конструкции отечественных или зарубежных ПВД, в основном, относятся к одному из этих типов.

Анализ опыта эксплуатации и характер повреждений подогревателей высокого давления показал, что для подогрева питательной воды до температуры 340°C целесообразно рассмотреть применение аппарата без поверхности теплообмена между греющей и нагреваемой средами.

Применение смешивающих подогревателей до настоящего времени ограничивается давлением отборного пара ниже атмосферного.

Приводятся результаты исследования теплообмена при конденсации пара на струях воды при низком давлении, полученные С.С. Кутателадзе, Г.Н. Абрамовичем, Н.М. Зингером, А.П. Солодовым, В.П. Исаченко, Г.Г. Шкловером, М.Д. Родивилиным, Г.И. Ефимочкиным, В.Л. Вербицким, В.Ф. Ермоловым, И.А. Трубом, О.П. Литвиным и другими специалистами.

Отмечается, что при высоком давлении (14,5 МПа) физические свойства греющей и нагреваемой сред существенно отличаются от сред при околоатмосферном давлении.

Поскольку безразмерные критерии, качественно характеризующие процесс, будут другими по величине и по степени влияния на теплообмен, полученные ранее критериальные уравнения не могут быть распространены на условия работы СПВД. Для обоснования работоспособности смешиваю-

щего подогревателя высокого давления необходимо проведение экспериментальных исследований при соответствующих параметрах сред.

**Во второй главе** сформулированы основные направления экспериментального исследования, приведены описание стендовой установки и экспериментального участка, методики проведения эксперимента и программы исследований.

Основными элементами стендовой установки являются система теплообменников для охлаждения перегретого пара от стационарного котла до требуемых параметров греющей и нагреваемой сред; системы дроссельных клапанов для регулировки давления рабочих сред; модели смешивающего подогревателя, в которой происходит смешение сред, конденсация пара и нагрев питательной воды; системы холодильников, в которых нагретая питательная вода охлаждается для дальнейшего сброса в бак конденсата ТЭЦ. Стендовая установка с моделью СПВД оснащена системой КИПиА.

Модель смешивающего подогревателя высокого давления (рисунок 1) состоит из корпуса (1), разделительной обечайки (2) и водоподающего устройства (3). По высоте корпуса расположены патрубки для подвода пароводяной смеси (4).

Для измерения температуры струи по высоте внутри обечайки установлены термопары в 12 сечениях: по 4 термопары в сечении на различном расстоянии от оси водоподающего устройства. В нижней части модели были установлены дополнительные термопары в трех сечениях по высоте для измерения температуры среды под обечайкой и термопары, находящиеся под уровнем воды в трех сечениях по высоте. Для измерения температуры среды вблизи разделительной обечайки дополнительно установлены термопары в 12 сечениях по высоте.



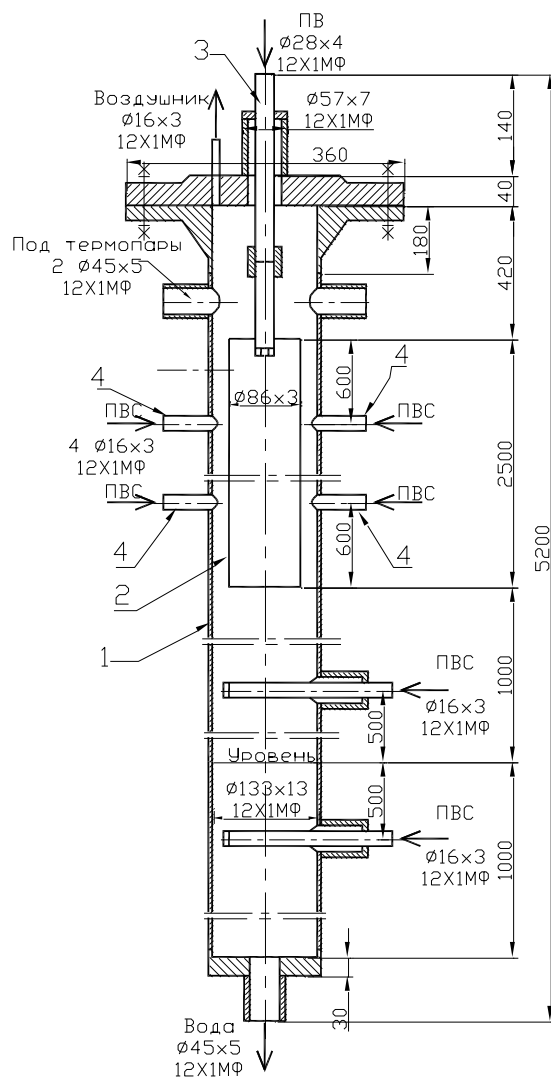


Рисунок 1 Модель смешивающего подогревателя высокого давления

Экспериментальные исследования процесса теплообмена на модели СПВД были проведены на пароводяной смеси различного паросодержания  $x=0,2 \div 0,98$  при следующих параметрах:

- скорость истечения воды из сопла  $w_в$  от 0,5 до 7 м/с;
- давление пара в аппарате  $p_{СПВД}$ : 1; 3; 5; 10; 14,5; 17 МПа;
- диаметр одиночного отверстия в водоподающем устройстве  $d_{отв}$ : 10, 20 мм;
- шаг между струями  $S=5; 10; 20$  мм для группы отверстий  $\varnothing 4$  мм, число отверстий  $n_{отв}=6$  шт.;
- температура питательной воды на входе в установку  $t_{нг}$ : 190; 230; 270; 305°С.

По специально разработанной методике на стендовой установке было проведено около 240 опытов по исследованию процесса теплообмена при нагреве отдельной струи, движущейся в пространстве, заполненном пароводяной смесью; группы струй с определением оптимального шага между ними; оценке влияния на процесс конденсации начальной скорости струи, температуры питательной воды, давления в аппарате и величины паросодержания пароводяной смеси, а также способа подвода греющей среды: помимо подвода в верхнюю часть, греющая среда подавалась в объем под разделительной обечайкой и под уровень нагретой воды.

**В третьей главе** проведен анализ процесса конденсации в СПВД, обобщаются полученные экспериментальные данные и анализируется влияние режимных и конструктивных факторов на эффективность процесса теплообмена в СПВД.

Для представления о взаимодействии смешивающихся потоков внутри рабочего объема подогревателя для каждого режима был построен график изменения температур сред по высоте теплообменника.

На рисунке 2а приведена предлагаемая схема смешения питательной воды и пароводяной смеси внутри обечайки. Высота расположения термопар отсчитывалась от доньшка водоподающего устройства. Кривая (1) представляет изменение температуры потока смешения, возникающего в результате взаимодействия питательной воды и пароводяной смеси внутри разделительной обечайки, а кривая (2) – температуру среды в пространстве между потоком смешения и стенкой обечайки. Вначале она равна температуре насыщения (3) при давлении в модели, затем ее величина становится равной температуре потока смешения (1). Это означает, что поток достигает стенок обечайки и термопары, установленные на ней измеряют температуру этого потока.

После завершения процесса конденсации на определенном расстоянии от среза сопла, температура потока смешения остается неизменной на всем пути до уровня подогретой среды в сосуде.

На графике изменения температуры потока смешения можно выделить 3 участка (рисунок 2б). На участке I происходит резкий рост температуры потока смешения при постоянной температуре среды в зазоре между струей и внутренней стенкой обечайки. По полученным экспериментальным данным на этом участке, длиной 50 мм от среза водоподающей насадки, передается ~90% теплоты от пароводяной смеси к питательной воде. На участке II скорость прогрева струи постепенно снижается и температура потока становится практически неизменной на всем расстоянии до уровня нагретой среды в подогревателе (участок III). На участке II происходит расширение потока до стенок обечайки на расстоянии ~500 мм от среза сопла, поток смешения перекрывает все живое сечение, поэтому спутных потоков не возникает, о чем свидетельствует равенство температур струи и стенки обечайки.

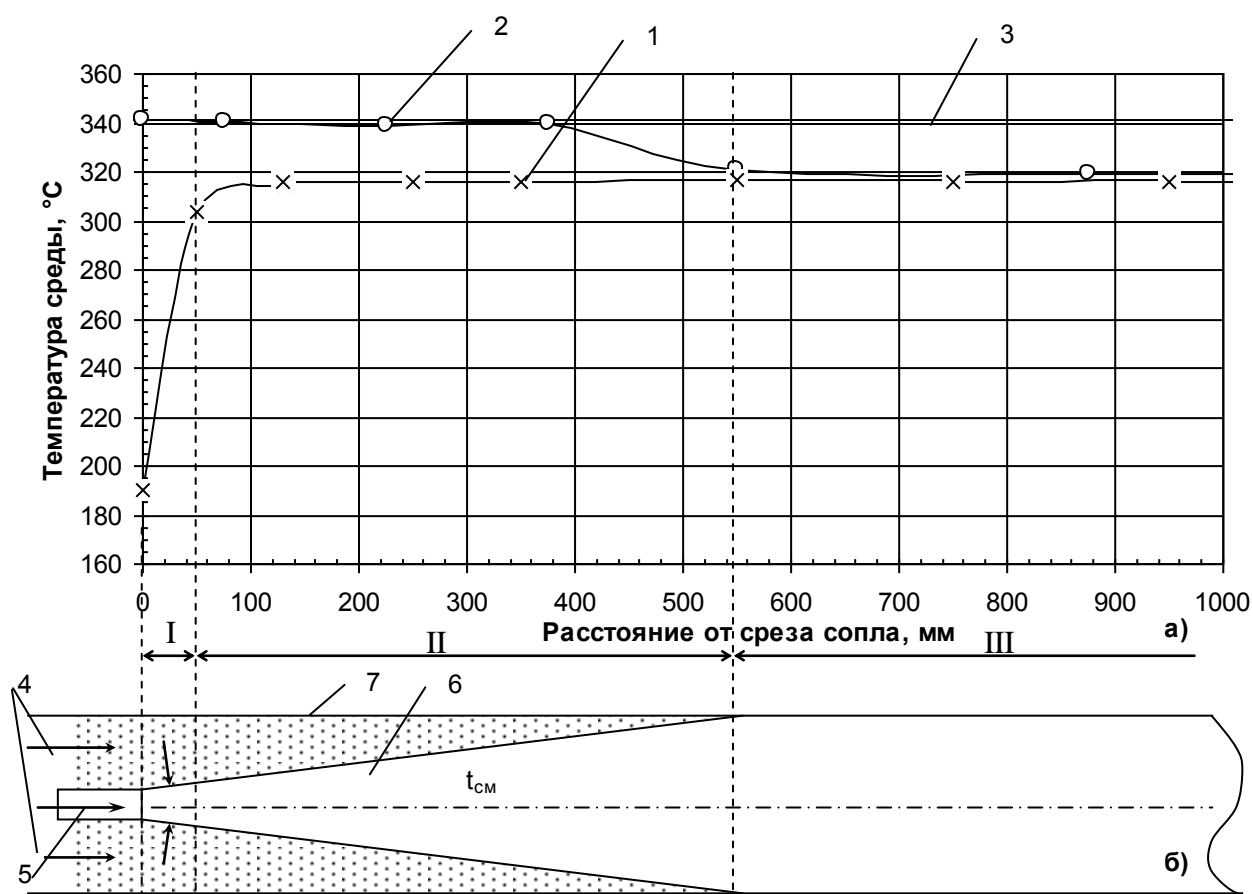


Рисунок 2 Изменение температуры сред по высоте теплообменника и предлагаемая схема распределения сред внутри обечайки

1 – температура потока смешения ( $t_{см}$ ); 2 – температура среды вблизи стенки обечайки; 3 – температура насыщения при давлении в СППВ; 4 – пароводяная смесь; 5 – питательная вода; 6 – поток смешения; 7 – разделительная обечайка.

Окончательный прогрев потока смешения завершается на расстоянии ~600 мм от среза сопла. На участке III температура потока смешения остается неизменной.

Критерием работоспособности смешивающего подогревателя является обеспечение догрева питательной воды до требуемого значения. Однако особенность процесса конденсации заключается в неравновесном протекании, происходящим в условиях, соответствующих температуре поверхности, на которой осуществляется конденсация. В результате чего возникают потери тепла, при которых энтальпия питательной воды на выходе из подогревателя не соответствует балансовому значению. Для оценки работоспособности аппарата вводится понятие относительного недогрева потока смешения из-за неравновесности процесса теплообмена, который определяется отношением разности энтальпий, рассчитанной по балансу, и энтальпии потока смешения, полученной в экспериментах, к балансовой энтальпии  $(i_{\sigma} - i_{cm})/i_{\sigma}$ .

В работе было рассмотрено, как влияют на относительный недогрев начальные параметры греющей (массовое паросодержание) и нагреваемой сред (скорость и начальная температура), а также конструктивные характеристики элементов смешивающего подогревателя (диаметр и шаг между струями, способы подвода греющей среды).

На рисунке 3 показано влияние массового паросодержания, скорости и начальной температуры питательной воды на  $(i_{\sigma} - i_{cm})/i_{\sigma}$  для одиночной струи  $\varnothing 10$  мм.

При росте начального паросодержания пароводяной смеси относительный недогрев возрастает за счет увеличения доли тепла, полученного в результате фазового перехода, протекающего в неравновесных условиях.

Влияние скорости истечения питательной воды рассматривалось для трех значений: 1,7; 3,5 и 7 м/с. С ростом скорости струи ее перемешивание с пароводяной смесью интенсивнее, в результате чего неравновесность процесса уменьшается и относительные потери снижаются вследствие изменения условий протекания процесса конденсации. Тем самым, процесс смешения является определяющим.

Влияние температуры питательной воды на неравновесность процесса конденсации неоднозначно. С одной стороны, чем ниже температура питательной воды, тем больше температурный напор между смешиваемыми средами, но, с другой стороны, ниже давление, определяемое температурой питательной воды, при котором происходит конденсация пара. Из рисунка 3 видно, что влияние температуры питательной воды на относительный недогрев наблюдается при скорости 1,7 м/с. Для скоростей 3,5 и 7 м/с значения недогревов для различных значений температур питательной воды практически совпадают.

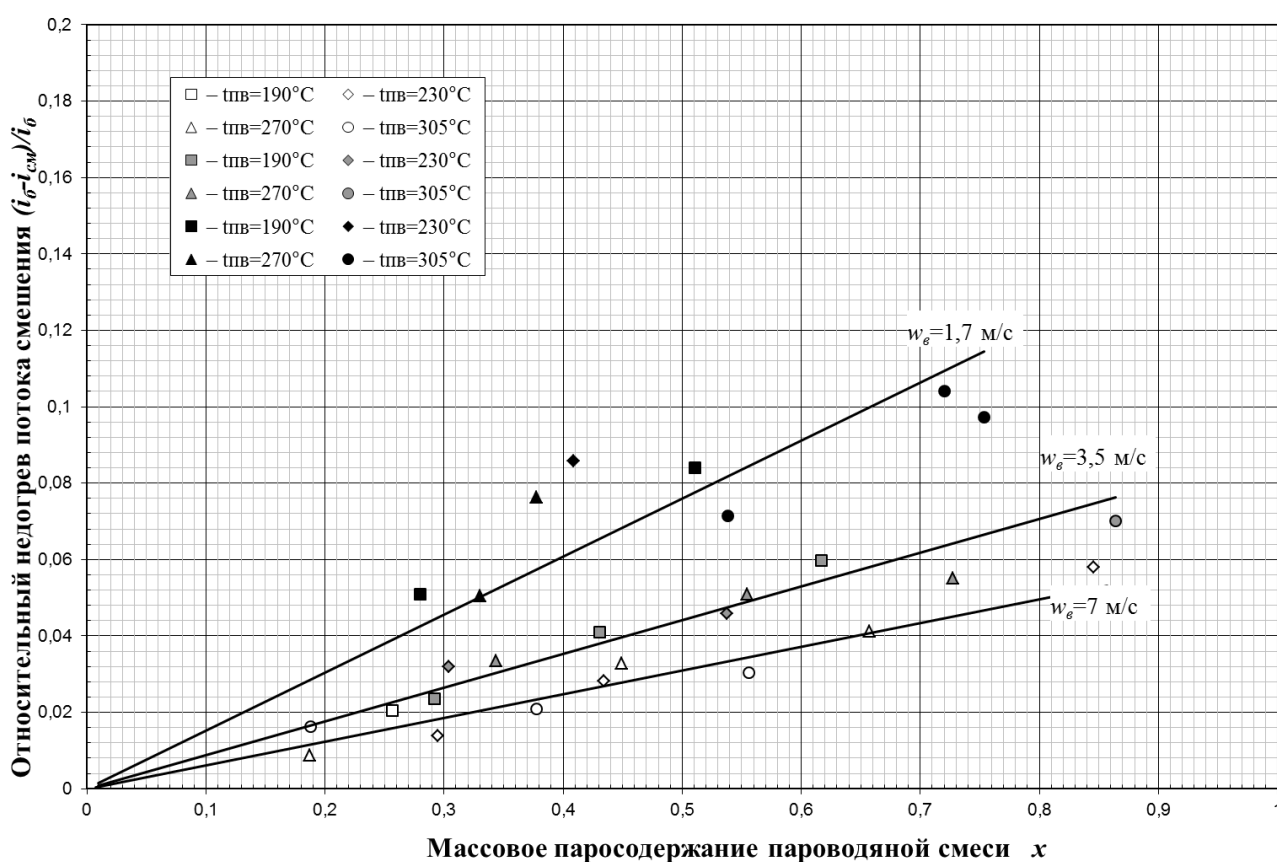


Рисунок 3 Влияние начальных параметров смешиваемых сред на относительный недогрев потока смешения в модели СПВД (для одиночной струи  $\varnothing 10$  мм)

Такой же характер расслоения по величинам недогрева для скорости питательной воды 1,7 м/с наблюдается и для водоподающих насадок другой конфигурации.

Рост давления будет способствовать увеличению степени неравновесности процесса, так как перепад между давлением в аппарате и давлением при котором происходит конденсация будет больше.

Влияние конструктивных факторов характеризуется применением насадок с различными диаметрами одиночных отверстий (10 и 20 мм), а также группы из 6 отверстий  $\varnothing 4$  мм с шагами 5, 10 и 15 мм между ними. На рисунке 4 показано влияние на относительный недогрев конструкции водоподающих насадок при давлении пара 14,5 МПа и массовом паросодержании  $x=0,8$ .

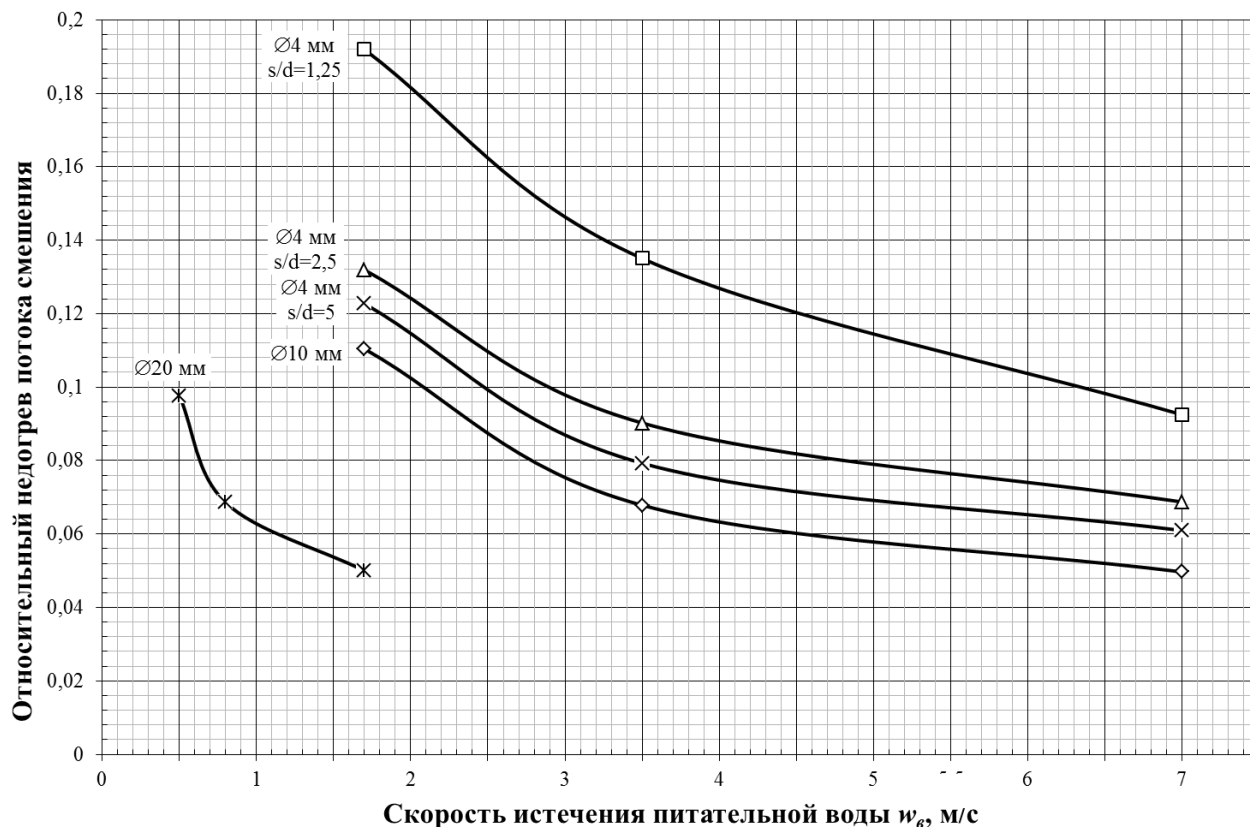


Рисунок 4 Влияние конструкции водоподающих насадок на эффективность процесса конденсации

Из рисунка 4 видно, что с увеличением диаметра отверстия относительные недогревы в процессе теплообмена снижаются. Шаг между струями оказывает значительное влияние на относительный недогрев. При относительном шаге  $S/d=1,25$  он максимален из-за плотного расположения струй, которое затрудняет эффективное смешение с пароводяной смесью. При увеличении относительного шага до 2,5, относительный недогрев снижается, а при  $S/d=5$  струи можно рассматривать как одиночные, так как их слияние происходит ниже зоны конденсации.

Опыты с различными способами подвода пароводяной смеси в модель СПВД показали, что способ подвода не оказывает существенного влияния на эффективность процесса конденсации.

Полученные в результате анализа зависимости относительного недогрева в процессе теплообмена от начальных параметров греющих и нагреваемых сред и конструктивных факторов легли в основу технических решений по конструкции элементов СПВД.

**В четвертой главе** представлены результаты испытаний, проведенных на опытной установке с полномасштабной по высоте моделью смешивающего подогревателя питательной воды.

Опытная установка моделирует фрагмент тепловой схемы с включением модели паропарового теплообменника с параметрами смешивающихся сред, моделирующими эксплуатационные режимы работы энергоблока, а также аварийную работу с отключенными поверхностными ПВД.

Основными задачами испытаний на опытной установке являлись сопоставление полученных результатов с результатами исследований на стендовой установке и уточнение влияния гидродинамических параметров (в первую очередь, скорости) на процесс смешения и конденсации в СПВД.

Результаты исследования на опытной установке показывают, что характер зависимости температур по высоте теплообменника качественно соответствует изменению, полученному ранее на стендовой установке с моделью СПВД: основное количество теплоты от пароводяной смеси к струе, как и в экспериментах на стендовой установке, передается на участке 50 мм, а окончательный прогрев питательной воды завершается на том же расстоянии (~600 мм) от среза водоподающей насадки. Таким образом, увеличение масштаба аппарата не влияет на протекание процесса конденсации.

Размеры корпуса полномасштабной по высоте модели СПВД позволили разместить несколько термопар в сечении внутри обечайки для измерения температурного поля потока смешения на различных высотных отметках рабочего участка аппарата. В результате было получено температурное поле единого потока смешения в разных сечениях по высоте.

На рисунке 5 представлены поля температур для трех скоростей питательной воды – 5, 10 и 20 м/с и значения массового паросодержания  $\sim 0,8$ . На рисунке показаны размеры обечайки и места измерения температур, размер водоподающего устройства и расположение отверстий.

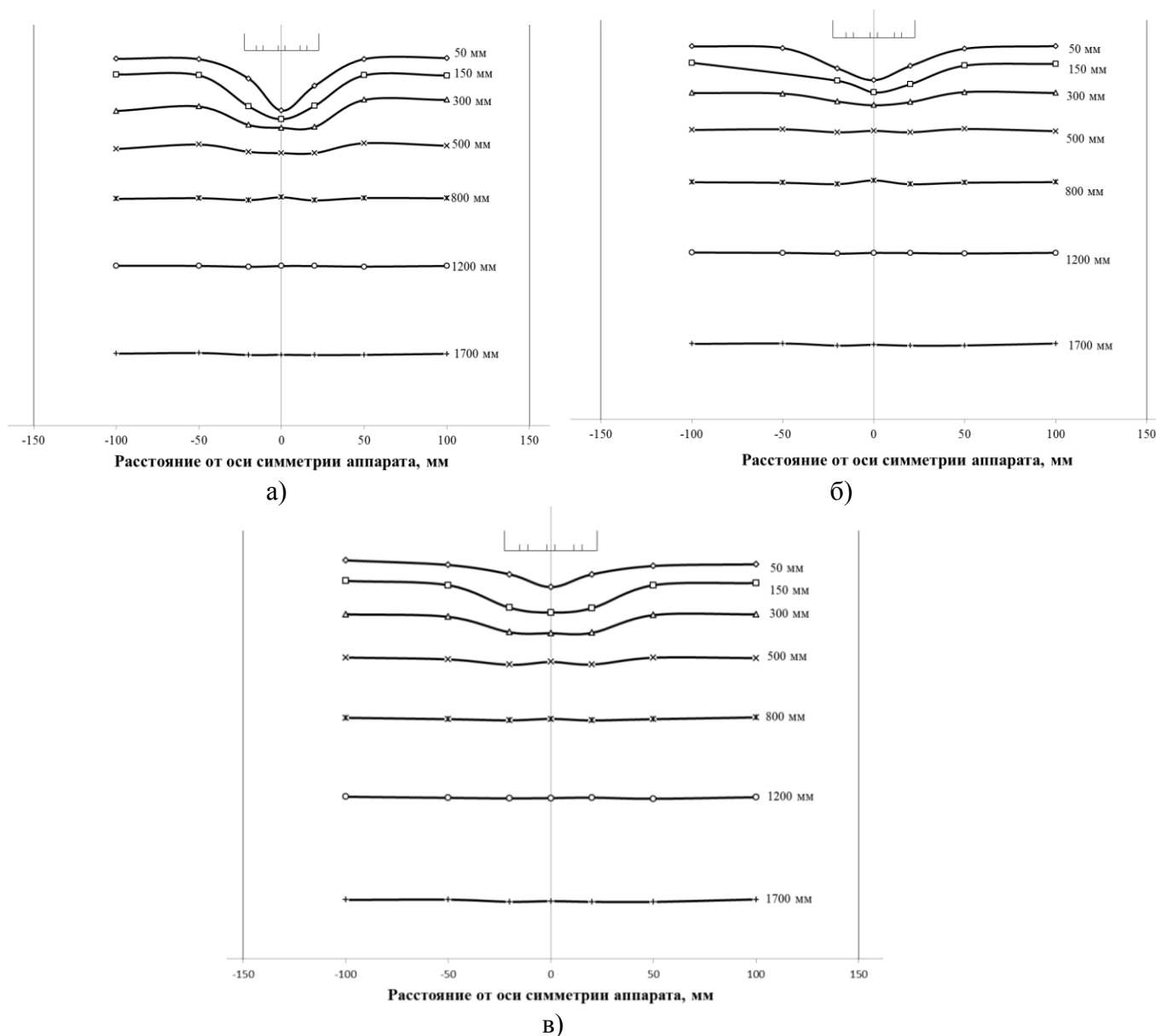


Рисунок 5 Температурное поле потока смешения для различных скоростей истечения питательной воды

Из рисунка 5а видно, что при скорости истечения 5 м/с температура в центре потока смешения в первых двух сечениях 50 и 150 мм по высоте заметно ниже температуры поверхности струи. С увеличением скорости истечения питательной воды увеличивается турбулизация струи и смешение происходит более интенсивно. На рисунке 5б показано поле температур при скорости истечения 10 м/с, которое сглажено по сравнению с предыдущим.



Например, для этой скорости в сечении 50 мм разница температур между поверхностью и центром потока смешения составляет  $\sim 7^\circ\text{C}$ , тогда как при скорости 5 м/с ее значение составляло  $\sim 33^\circ\text{C}$ . Для скорости 20 м/с (рисунок 5в) температурное поле практически выровнялось, так как температура поверхности потока смешения практически не отличается от температуры окружающей его среды.

Экспериментальные данные, полученные на опытной установке, показывают, что процесс конденсации пара из пароводяной смеси на струях питательной воды при высоком давлении происходит в неравновесных условиях с недогревом потока смешения до температуры насыщения при расходе пароводяной смеси, определенной по уравнению теплового баланса, тем самым, подтверждая результаты исследований на стендовой установке с моделью СПВД.

Наибольший недогрев наблюдался при низких скоростях истечения питательной воды (2 м/с). С ростом скорости истечения значение недогрева снижается, особенно в интервале от 2 до 10 м/с. При дальнейшем увеличении скорости истечения (более 10 м/с) снижение относительного недогрева незначительно.

Характер зависимостей  $(i_\sigma - i_{cm})/i_\sigma = f(w_{ne}, x, t_{ne})$  качественно совпадает с полученными на стендовой установке (рисунок 3). С ростом паросодержания пароводяной смеси относительный недогрев потока смешения увеличивается, а с ростом скорости истечения питательной воды снижается за счет более эффективного смешения пароводяной смеси и питательной воды.

Результирующая зависимость экспериментальных данных (рисунок 6), полученных на опытной установке, эквидистантна зависимостям для стендовой модели СППВ и находится между кривыми для группы отверстий с относительными шагами  $S/d=1,25$  и  $2,5$ . Это подтверждает согласованность и достоверность данных, полученных на стендовой и опытных установках.

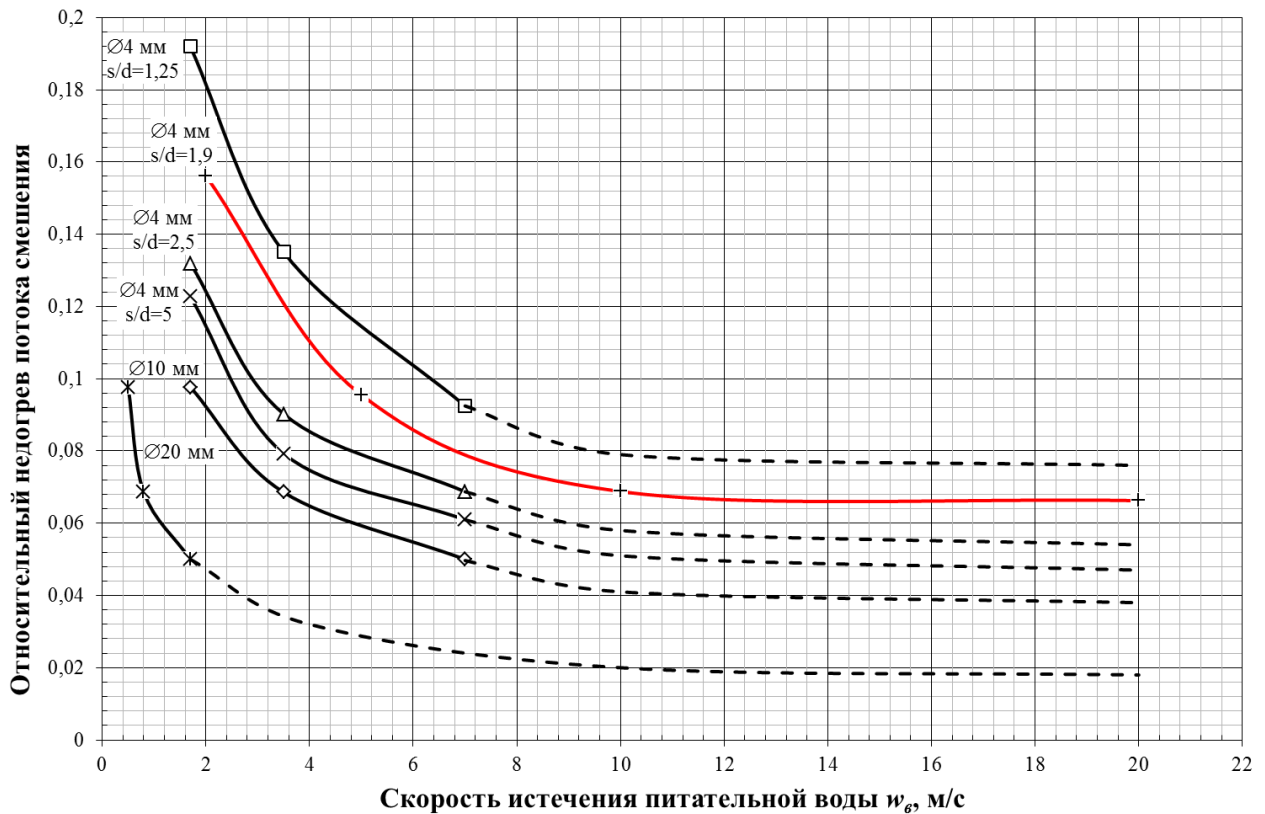


Рисунок 6 Обобщенная зависимость результатов экспериментальных исследований на стендовой и опытной установках

**В пятой главе** представлено обобщение результатов экспериментальных исследований в виде расчетной зависимости относительного недогрева от начальных параметров смешивающихся сред и конструктивных данных элементов СПВД, а также технические решения по конструкции элементов смешивающего подогревателя питательной воды высокого давления.

Эффективность теплообмена определяется условиями смешения и зависит от скорости истечения питательной воды в паровое пространство ( $w_6$ ), диаметра отверстия истечения ( $d_{оме}$ ), массового паросодержания греющей среды ( $x$ ), а также относительного шага между отверстиями ( $S/d_{оме}$ ) и характеризуется зависимостью:

$$\frac{i_{\sigma} - i_{см}}{i_{\sigma}} = f(w_6; d_{оме}; x; S/d_{оме}) \quad (1)$$

где  $i_{\sigma}$  – энтальпия нагретой воды, рассчитанная по тепловому балансу, кДж/кг;  $i_{см}$  – энтальпия нагретой воды, полученная в результате теплообмена с учетом неравновесности процесса конденсации, кДж/кг.

В диапазоне изменения основных параметров:

- давление в аппарате 14,5 МПа;
- массовое паросодержание греющей среды ( $x$ ): 0,3÷1;
- начальная температура питательной воды: 190÷305°C;
- скорость истечения питательной воды ( $w_g$ ): 0,5÷10 м/с;
- диаметр отверстий в водоподающем устройстве ( $d_{оме}$ ): 4÷20 мм;
- относительный шаг между отверстиями  $S/d=1,25÷5$ .

выражение (1) преобразуется в формулу (2):

$$\frac{i_{\sigma} - i_{cm}}{i_{\sigma}} = 49,01 \cdot Re^{-0,49} \cdot x^{0,99} \cdot (S/d_{оме})^{-0,3}, \quad (2)$$

где  $Re = \frac{w_g \cdot d_{оме}}{\nu_g}$  – критерий Рейнольдса;

$\nu_g$  – кинематическая вязкость питательной воды, м<sup>2</sup>/с.

Полученные результаты позволили сформулировать основные технические рекомендации по конструкции элементов смешивающего подогревателя. В основном это касается выбора скорости истечения питательной воды; оптимизации конструкции разбрызгивающих устройств в паровом пространстве аппарата для повышения эффективности теплообменных процессов и способа подвода греющей среды.

Оптимальное соотношения гидравлического сопротивления водоподающего устройства и относительного недогрева потока смешения (по рисунку б) для реального аппарата достигается при скорости истечения равной 10 м/с.

Проникновение пароводяной смеси ко всем струям питательной воды при многоярусном исполнении водоподающего устройства в реальном смешивающем подогревателе зависит от шага между отверстиями. Равномерное распределение пара между струями повышает эффективность смешения и снижает относительный недогрев питательной воды.

Влияние диаметра отверстий и относительного шага ( $S/d$ ) между ними показано на рисунке 7, для построения которого использованы данные, полученные для насадок с несколькими отверстиями  $\varnothing 4$  мм и относительными шагами  $S/d=1,25$ ; 1,9; 2,5 и 5; и насадок с одиночными отверстиями  $\varnothing 10$  и

20 мм; при давлении в СПВД – 14,5 МПа, паросодержании  $x=0,8$ , скорости истечения питательной воды – 10 м/с.



Рисунок 7 Влияние на теплообмен диаметра отверстий и относительного шага между ними для водоподающего устройства СПВД

Рекомендуемое значение относительного шага составляет  $S/d=5$ .

Скорость истечения питательной воды определяет сечение для прохода среды, количество и диаметр отверстий струйной форсунки, которая оптимизируется по наименьшему относительному недогреву, и возможностью конструктивного исполнения водоподающего устройства по количеству отверстий и шагов между ними. В конструкции водоподающего устройства с отверстиями  $\varnothing 20$  мм количество отверстий и рядов по высоте трубы меньше соответственно в 4 и 2 раза, чем для варианта с отверстиями  $\varnothing 10$  мм, которая позволяет греющей среде более равномерно распределяться между рядами отверстий водоподающей трубы и эффективнее смешиваться с нагреваемой средой.

В результате экспериментальных исследований не выявлено зависимости длины зоны прогрева  $L_{np}$  питательной воды от начальных условий, и ее длина соответствует 600 мм. В реальном смешивающем подогревателе

направление разбрызгивания струй перпендикулярно стенкам защитной обечайки. Длина зоны прогрева питательной воды определяется расстоянием от среза сопла до стенок защитной обечайки, и диаметр обечайки должен быть более  $D_{об} > 3L_{пр}$  или  $D_{об} > 1800$  мм.

Греющую среду в СПВД рекомендуется подавать в верхнюю часть аппарата в зазор между обечайкой и корпусом. При подводе греющей среды под обечайку пароводяная смесь частично вытесняет воду из аппарата, что недопустимо, так как в нем должен обеспечиваться запас воды. При подводе греющей среды под уровень существует вероятность выноса пузырьков пара из подогревателя, что также недопустимо по условиям работы питательного насоса.

Для верхнего подвода греющей среды проведена оценка возможности сноса паровых пузырей в объеме нагретой воды в нижней части аппарата. Для выбранного диаметра корпуса СПВД, равного 3 м, при номинальном режиме работы значение скорости опускного тока ниже скорости сноса и захват пара исключен. Однако, для аварийного режима работы с отключенными поверхностными ПВД максимальное значение скорости опускного тока смеси близко к предельному значению.

Практическая реализация рекомендованных в диссертации технических решений по конструкции водоподающего устройства, скоростям истечения питательной воды и способу подвода греющей смеси позволят сократить недогрев потока смешения по сравнению с балансовой величиной до 35 кДж/кг ( $\sim 4^\circ\text{C}$ ).

Полученные в диссертации результаты разрабатывать конструкции смешивающих регенеративных подогревателей высокого давления в тепловых схемах перспективных энергоблоков.

### **Выводы**

1. Экспериментально обоснована возможность использования контактного теплообмена при смешении паровой и водяной сред для подогрева питательной воды при высоком ( $\sim 15$  МПа) давлении.

2. На специально созданных стендовой и опытной установках изучен теплообмен при конденсации пара на струях питательной воды при высоком давлении, выявлен механизм процесса, получены зависимости, позволившие оценить эффективность процесса конденсации и сформулировать технические решения по конструкции элементов смешивающего подогревателя.
3. Установлено, что:
  - в исследованном диапазоне параметров теплообмен между греющей и нагреваемой средой при высоком давлении происходит достаточно интенсивно и завершается на расстоянии  $\sim 600$  мм от среза сопла при различных масштабах моделирования подогревателя и входных параметрах;
  - эффективность теплообмена зависит от условий смешения греющей и нагреваемой сред, которые определяют протекание процесса конденсации;
  - с возрастанием массового паросодержания греющей среды увеличивается степень неравновесности процесса;
  - в исследованном диапазоне рост скорости истечения питательной воды из водоподающего устройства приводит к уменьшению относительного недогрева воды за счет более эффективного перемешивания греющей и нагреваемой сред;
  - влияние начальной температуры питательной воды проявляется при скоростях истечения  $\leq 2$  м/с, при более высоких скоростях это влияние незначительно;
  - с увеличением диаметра отверстий ( $\varnothing 4 \div 20$  мм) и относительного шага между струями в водоподающем устройстве ( $S/d = 1,25 \div 5$ ) относительный недогрев потока смешения снижается.
4. На основе экспериментальных исследований получена обобщенная зависимость относительного недогрева потока смешения от основных конструктивных и режимных параметров, используя которую можно рассчитывать выходные параметры нагретой среды.
5. Разработаны и обоснованы технические решения по конструкции смешивающего подогревателя высокого давления перспективных энергоблоков

электростанций, способных обеспечить подогрев питательной воды до более высоких, чем в поверхностных ПВД температур вплоть до целесообразных при ультракритических параметрах пара.

6. Использование таких смешивающих ПВД в тепловых схемах перспективных энергоблоков создает возможность дальнейшего повышения их экономичности и надежности.

### **Перечень публикаций по теме диссертации**

1. **Ерошкина, Е.В.** Экспериментальное исследование теплообмена при конденсации пара из пароводяной смеси на струях воды при высоком давлении / Е.В. Ерошкина, В.И. Кисина, А.Л. Шварц, А.В. Колбасников // Теплоэнергетика. -2007. -№1. -с. 53-57.
2. **Сомова, Е.В.** Процесс конденсации пара из пароводяной смеси на струях воды при высоком давлении / Е.В. Сомова, В.И. Кисина, А.Л. Шварц, А.В. Колбасников, В.П. Канищев // Теплоэнергетика, -2009. № 1. –с. 63-70
3. **Сомова, Е.В.** Исследования смешивающего подогревателя питательной воды на фрагменте II-го контура реакторной установки нового поколения / Е.В. Сомова, В.И. Кисина, А.Л. Шварц, А.В. Колбасников, В.П. Канищев // Теплоэнергетика. -2009. № 6. –с 59-63
4. **Ерошкина, Е.В.** Исследование теплообмена в подогревателе смешивающего типа при контакте пароводяной смеси с распыленной водяной струей. / Е.В. Ерошкина // 2-й конкурс молодых специалистов ОАО "ВТИ": сб. докл. – Москва, 2003г. –с. 16-24
5. **Сомова, Е.В.** Исследование процесса тепломассопереноса в потоках воды и пароводяной смеси при высоких давлениях / Е.В. Сомова, В.И. Кисина, А.Л. Шварц, А.В. Колбасников // Третья Международная конференция Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: сб. тез. докл. – Москва, 2008г. –с. 251-252