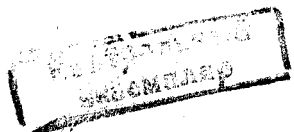


2
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ЗАЧНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



На правах рукописи

ЮРТАЕВ Михаил Александрович

УДК 621.181.02

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ВПРЫСКИВАЮЩИХ ПАРООХЛАДИТЕЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ
ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ РАБОТЫ

Специальность 05.14.04 - "Промышленная теплоэнергетика"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1990

Работа выполнена на кафедре "Промышленная теплоэнергетика"
Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор ЗАРЯНКИН А.Е.

Официальные оппоненты: доктор технических наук ШВАРЦ А.Л.,
кандидат технических наук,
доцент ВЕРЕС А.А.

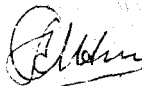
Ведущее предприятие - Подольский машиностроительный
завод им. Орджоникидзе (ЗиО).

Защита состоится "___" _____ 1990 г., в "___" часов,
на заседании специализированного совета К 053.20.01 по присуж-
дению ученой степени кандидата технических наук при Всесоюзном
ордена Трудового Красного Знамени заочном политехническом инсти-
туте по адресу: 129278, Москва, ул. Павла Корчагина, 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "___" _____ 1990 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук,
доцент

 АНТОНОВ А.Я.

Актуальность работы. Для регулирования температуры перегретого пара на тепловых электростанциях широко используются различные по назначению и конструкции впрыскивающие пароохладители, относящиеся по своему принципу действия к теплообменникам смешивающего типа. В довольно распространенном виде эти устройства представляют собой прямой участок паропровода, оборудованный устройством подачи в поток пара охлаждающей воды и рубашкой, помещаемой во внутрь трубы с целью предохранения её металла от воздействия впрыскиваемой воды.

Пароохладители в значительной степени определяют маневренность, а значит, и экономичность работы энергетического оборудования станций. Однако практика показывает, что они либо работают недостаточно эффективно, либо выходят из строя по причине повреждений различных их элементов. Среди встречающихся повреждений типичными являются разрушения защитных рубашек. Эти разрушения обусловлены действием термических напряжений, возникающих в металле при взаимодействии с впрыскиваемой водой. Однако до последнего времени вопросам изучения условий работы металла защитных рубашек не было уделено должного внимания. Совершенствование проектирования пароохладителей, выбор правильных режимов их эксплуатации, оценка ресурса элементов пароохладителей должны опираться на расчётно-экспериментальную основу, позволяющую глубже понять физику происходящих в его канале процессов. В этой связи решаемые в работе вопросы актуальны как с практической, так и теоретической точек зрения.

Работа проводилась в соответствии с темой "Повышение надёжности впрыскивающих пароохладителей тракта СКД котлов", выполняемой по заданиям 01 и 04 подпрограммы ГКНТ СМ СССР О.Ц.002 (п.2.2, раздел II рабочего плана НИР); утверждённой совместным постановлением ГКНТ СМ СССР, Госплана СССР и АН СССР от 29.12.81 г., № 516/272/174; с координационным планом НИР Минэнерго СССР на 1985...1986 г.г. в области эксплуатации энергетического хозяйства (№ пп/шифр 38/06737).

Цель работы является повышение надёжности и эффективности работы впрыскивающих пароохладителей систем промперегрева энергоблоков ТЭС. В связи с этим необходимо:

- разработать математическую модель процессов пароохладителя с учётом его конструктивных, режимных и технологических факторов;

- провести комплекс экспериментальных исследований, включающих в себя исследование условий работы металла защитной рубашки в установившихся и переходных тепловых режимах пароохладителя, а также исследование температурного поля потока и стенки канала на всём протяжении участка испарения впрыскиваемой воды;

- разработать методику расчёта процесса теплообмена в канале пароохладителя, позволяющую находить для заданных режимных данных характеристики парокапельного потока и нестационарное поле температур в стенке канала по длине участка испарения воды;

- на основании результатов экспериментов и исследований, выполненных с помощью математической модели, разработать и внедрить новые, более надёжные конструкции парохладителей.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- впервые разработана математическая модель процессов впрыскиваемого пароохладителя, учитывающая полидисперсность распыливания охлаждающей воды, взаимодействие её капель с потоком пара и горячей стенкой канала, образование, рост и движение на ней плёнки воды;

- численно решена сопряжённая задача теплообмена в канале с потоком пара, содержащим капли диспергируемой в нём воды;

- на основе метода балансов энергии разработана методика численного расчёта нестационарного температурного поля стенки канала, взаимодействующей с парокапельным потоком;

- предложен метод описания граничных условий на горячей поверхности стенки, орошаемой потоком распыленной жидкости;

- впервые на специальном паровом стенде проведено комплексное экспериментальное исследование температурного режима металла защитной рубашки пароохладителя в условиях, приближённых к натурным.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Полученные в работе результаты в наибольшей мере применимы к парохладителям трактов вторичного перегрева пара энергоблоков ТЭС. Обширная база данных, полученная в процессе расчётно-экспериментальных исследований парохладителей, используется во Всесоюзном теплотехническом институте им. Ф.Э. Дзержинского и на Подольском машиностроительном заводе им. С.Орджоникидзе как материал исследовательской деятельности и заводской практики в деле совершенствования конструкций исследованного типа парохладителей, разработки различных рекомендаций по их проектированию, изготовлению и эксплуатации, создания методик прочностных расчётов элементов парохладителей. Полученные сведения о температурном режиме металла

защитной рубашки позволяют определить уровень возникающих в ней термических напряжений, а также оценить её ресурс. Предлагаемая методика расчёта нестационарного температурного поля нагретой стенки, орошаемой каплями воды, может использоваться при решении различных технических задач, связанных с исследованием процессов охлаждения высокотемпературных поверхностей диспергированной жидкостью.

Разработанная математическая модель, реализованная в виде вычислительной программы для ЭВМ, позволяет с учётом конструктивных, режимных и технологических факторов рассчитывать наиболее важные характеристики происходящих в канале пароохладителя процессов. С её помощью был проведен анализ работы пароохладителя аварийного впрыска котла ПК-41-1 для условий использования в нём различных по характеристикам центробежных форсунок. При этом была найдена оптимальная конструкция узла впрыска, внедрение которой на котлах Кармановской ГРЭС повысило надёжность и эффективность действия впрысков в широком диапазоне изменения нагрузок энергоблоков. Внедрение дало экономический эффект 58,5 тыс. руб. в год.

Достоверность и обоснованность результатов работы. В работе использовались современные средства и методы экспериментальных исследований сложных тепловых объектов. Принятые модели процессов обоснованы экспериментально. Сопоставление результатов расчётов и данных экспериментов показало удовлетворительное качественное и количественное совпадение. В процессе реализации математической модели использовались современные средства программирования (язык ФОРТРАН-IV) и вычислительная техника (ЭВМ ЕС-1033).

На зачет выносятся:

- впервые разработанная математическая модель процессов впрыскивающего пароохладителя, учитывающая полидисперсность распыливания охлаждающей воды, взаимодействие её капель с потоком пара и горячей стенкой канала, образование, рост и движение на ней плёнки воды;

- численный метод решения сопряжённой задачи теплообмена в канале пароохладителя, позволяющий определять одновременно характеристики парокапельного потока по длине участка испарения впрыскиваемой воды и нестационарное поле температур в ограничивающей его стенке;

- методика описания граничных условий на поверхности нагретой стенки, орошаемой потоком распыленной жидкости;

- результаты экспериментальных исследований впрыскивающих

пароохладителей, полученные на полупромышленном паровом стенде и на натурном объекте, позволившие сделать ряд важных практических рекомендаций, а также выполнять проверку и корректировку разрабатываемой математической модели;

- результаты усовершенствования пароохладителей аварийного впрыска котлов ПК-41-1, являющиеся практическим итогом расчётно-экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- 7-ой и 9-ой Всесоюзных научно-методических семинарах по САПР "Автоматизация проектирования в электротехнике и энергетике" (г.Иваново, 1982 г. и г.Челябинск, 1985 г.);

- выездном заседании секции Совета ГКНТ СССР на тему "Надёжность котельных поверхностей нагрева и актуальные вопросы теплообмена и гидравлики" (г.Подольск, 1984 г.);

- VII Всесоюзной конференции "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах" (г.Ленинград, 1985 г.);

- ежегодных итоговых научно-технических конференциях Челябинского политехнического института (г.Челябинск, 1981...1988 г.г.);

- научно-технических семинарах кафедр "Паровые и газовые турбины" и "Промышленные теплоэнергетические системы" Московского энергетического института (г.Москва, 1986 г. и 1989 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, получено одно авторское свидетельство СССР.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 131 наименования и 4 приложений. Работа изложена на 159 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков, 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается область применения и разновидности конструкций впрыскивающих пароохладителей. Дан обзор и анализ работ, посвящённых их исследованию в промышленных и лабораторных условиях.

По конструкции впрыскивающие пароохладители можно разделить на два вида: пароохладители с сужающим устройством, где охлаждающая вода подаётся в паровой канал через отверстия в узком его сечении, и пароохладители без сужения парового канала с впрыском

воды с помощью струйных или центробежных форсунок. Использование парохладителей с сужающим устройством, несмотря на успешную работу их при различных параметрах пара, не всегда целесообразно. В случаях, когда вырски работают непродолжительное время (пусковые и аварийные вырски), рационально иметь канал постоянного сечения.

Основное требование, предъявляемое к парохладителям, заключается в том, чтобы испарение вырскиваемой воды в них происходило на возможно меньшей длине канала. Длина участка испарения зависит от различных факторов, одним из которых является качество распыливания воды. При вырскивании воды с помощью струйных форсунок невозможно добиться качественного распыливания. Поэтому их целесообразно применять при высоких и закритических параметрах пара, когда условия для дробления и испарения воды максимально благоприятны. В пусковых парохладителях, в трактах промперегрева пара, желательно использовать центробежные форсунки, обеспечивающие более тонкий распыл охлаждающей воды.

Обзор литературы показывает, что проведенные исследования нацелены были в основном на разработку методик расчёта длины испарительного участка. В ходе этих исследований получены общие представления о рабочих процессах парохладителей, оценивалось влияние отдельных факторов на длину испарительного участка. Подчеркивается, что взаимодействие вырскиваемой воды с металлом рубашки и корпуса парохладителя приводит к отрицательным последствиям. Отсутствие сведений об условиях работы металла затрудняет проектирование парохладителей, выбор рациональных режимов их эксплуатации. Установлено, что вырскиваемая вода в канале может находиться в виде капель в потоке и в виде плёнки, выпавшей при определённых условиях на стенки канала. Однако механизм образования и динамика дальнейшего поведения её на горячей стенке канала не раскрыты. На основании проведенного анализа сформулированы основные задачи настоящих исследований. Исследования предлагается вести как экспериментально, так и путём математического моделирования.

Вторая глава посвящена описанию специального парового стенда, на котором реализована экспериментальная часть исследований, а также техники и методики проведения эксперимента и обработки опытных данных.

Экспериментальный стенд, тепловая схема которого показана на рис. 1, смонтирован на Челябинской ТЭЦ-2. Геометрические размеры и параметры пара стенда близки по своим значениям соответствующим

Тепловая схема экспериментального стенда

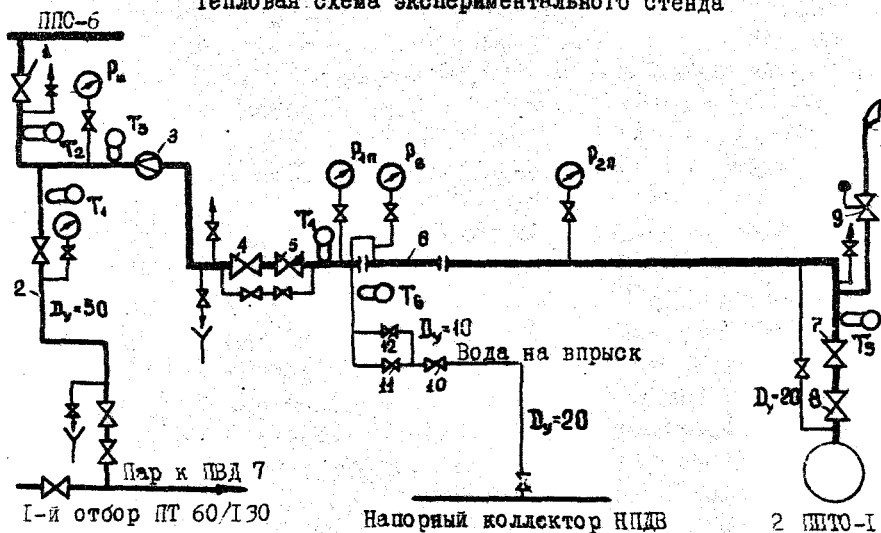


Рис. I

показателям реальных пароохладителей систем промпрегрева энергетических блоков ТЭС. Пар на опытный участок стенда подавался через запорную задвижку I из коллектора собственных нужд станции с параметрами $P_n = 0,8 \dots 1,3$ МПа и $t_n = 250 \dots 300$ °С по подводящему паропроводу $D_y = 250$ мм и по трубе 2 $D_y = 50$ мм из первого отбора турбогенератора ПТ-60/130 ($P_n = 4$ МПа и $t_n = 450$ °С). Дозируя эти потоки можно было иметь перед экспериментальным участком стенда температуру пара до 400 °С. За участком смешения указанных потоков установлена измерительная диафрагма 3, рассчитанная на максимальный расход пара 32 т/ч, а далее - задвижка 4 и регулирующий клапан 5. Расположенный за ними прямой участок паропровода диаметром 273x8 мм и протяженностью около 13 м являлся опытным участком стенда. В начале его смонтирована съёмная вставка 6 длиной 1,2 м, которая оборудована исследуемой защитной рубашкой, помещённой во внутрь с небольшим кольцевым зазором, и устройством подачи воды с установленной на нём форсункой. Съёмный участок стенда взаимозаменяем и в зависимости от решаемых задач имел различные варианты. Следующий за ним участок паропровода длиной 10 м предназначен для испарения впрскиваемой воды, в качестве которой использовался конденсат с параметрами $P_b = 1,5$ МПа и $t_b = 70 \dots 100$ °С.

Пар после стенда сбрасывался в коллектор $P_n = 0,12 \dots 0,25$ МПа через задвижки 7 и 8. С помощью указанной запорно-регулирующей арматуры стенда можно было устанавливать желаемые параметры пара и размеры впрысков. Параметры пара перед экспериментальным участком в проведенных опытах изменялись в следующих пределах: $P_{1п} = 0,2 \dots 0,8$ МПа; $t_{1п} = 243 \dots 380$ °С; расход $G_n = 7,4 \dots 30,1$ т/ч, что соответствовало изменению средней его скорости перед пароохладителем $w^p = 20,9 \dots 132,2$ м/с (внутри рубашки соответственно $w_r^p = 26,7 \dots 166,7$ м/с). Степень впрыска (отношение расхода воды к расходу пара) устанавливалась в пределах $q = 1,9 \dots 8,6$ %, чем обеспечивалось снижение температуры пара на величину $\Delta t_n = 20 \dots 105$ °С. Расход воды на впрыск рассчитывался по тепловому балансу пароохладителя и контролировался по перепаду давления её на распылителе. Для контроля за температурой пара и воды в характерных точках стенда устанавливались штатные термометры $T_1 \dots T_6$. Схемой специальных измерений (рис. 2) предусматривалось измерение температуры металла рубашки в различных её точках, а также потока и металла паропровода по длине участка испарения. Для этой цели использовались термометры специального изготовления, которые в зависимости от исследуемых тепловых режимов (установившихся или переходных) подключались либо к автоматическим потенциометрам, либо к многоканальным светолучевым осциллографам.

Схема расположения точек измерения температур на экспериментальном участке стенда

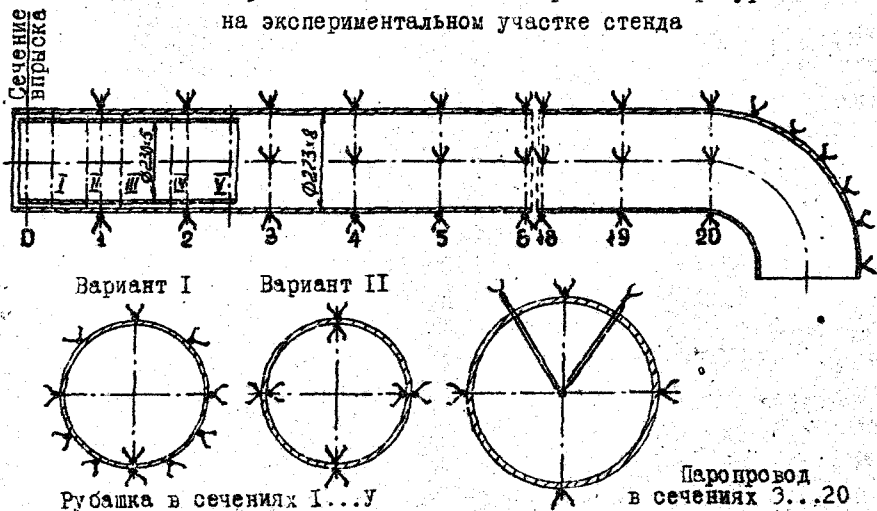


Рис. 2

Третья глава посвящена разработке математической модели процессов впрыскивающего пароохладителя. В качестве исходной его конструкции взят пароохладитель без сужения парового канала с впрыском воды с помощью центробежной форсунки, установленной в центре сечения канала.

Работа впрыскивающего пароохладителя характеризуется сложным комплексом взаимосвязанных физических процессов. Основными из них являются: процессы распыливания воды и образования полидисперсного спектра капель, движения, деформации и вторичного дробления капель под воздействием потока пара, процессы прогрева и испарения капель, обуславливающие изменение их размеров и параметров пара по длине канала, процессы взаимодействия капель с горячей стенкой канала и образования при определённых условиях на ней плёнки воды. Перечисленные процессы описываются системой сложных дифференциальных уравнений для потока и уравнением теплопроводности для стенки канала. Детальное описание процессов и решение уравнений в общей постановке представляется весьма затруднительным. Основные закономерности процессов в данной сопряжённой задаче были выявлены и количественно оценены на более простых моделях. Принято, что течение в канале осесимметричное, скорость пара по сечению одинакова и равна среднему её значению, по длине канала нет потерь давления, вода впрыскивается при температуре насыщения, объём и сечение потока пара не изменяется из-за наличия в нём капель, капли не сталкиваются между собой: движение каждой из них рассматривается так, как будто остальные отсутствуют, получившийся от испарения капель пар на каждом элементарном участке канала смешивается до полной однородности с паром потока.

При разработке математической модели отдельные составляющие процессов представлены в виде автономных математических моделей. Для составления моделей использовались результаты экспериментов настоящих исследований, а также общепринятые и известные по публикациям решения из области гидродинамики и теплообмена.

Модель процесса распыливания представлена соотношениями, описывающими дисперсные характеристики распыла охлаждающей воды и уравнением Розин-Раммлера, описывающим функцию распределения объёмов капель по диаметрам. В процессе реализации модели реальный распыл представлен в виде дискретного набора фракций с соответствующими начальными диаметрами капель d_{oi} (индексы: 0 - относятся к величинам в сечении впрыска, i - номер фракции, число их $K = 40$). Кривая

распределения при этом представляется также в виде дискретной функции. На основе её данных и данных о расходе воды на впрыск вычислялись количество капель каждой фракции N_i , производимых форсункой за единицу времени. Модель реализована на ЭВМ в виде отдельного программного модуля, являющегося составной частью единой вычислительной программы.

Анализ сил, действующих на одиночную каплю, показал, что при рассмотрении траекторий движения частиц влаги в канале пароохладителя можно ограничиться лишь учётом силы аэродинамического воздействия потока на каплю. При этом уравнение движения капли приводится к виду

$$\frac{dU}{d\tau} = - \frac{3}{4} C_x \Psi(We) \frac{\rho_n}{\rho_s} U^2, \quad (1)$$

где U - относительная скорость капли; τ - время; C_x - коэффициент аэродинамического сопротивления капли; $\Psi(We)$ - функция, введённая для учёта деформации капли (зависит от числа Вебера капли We); ρ_n и ρ_s - плотность пара и воды.

Координаты капель (осевая - x и радиальная - y) относительно точки их ввода рассчитываются при этом как

$$\left. \begin{aligned} x &= U\tau + l \cos \gamma \\ y &= l \sin \gamma \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где l - путь, пройденный каплей в направлении её относительной скорости; γ - угол между векторами скорости пара и относительной скорости капли.

Из уравнения теплового баланса капли вытекает уравнение, описывающее закон изменения её массы m_k в процессе испарения

$$\frac{dm_k}{d\tau} = \frac{\alpha(t_n - t_k) S_k}{z}, \quad (3)$$

где t_n и t_k - температура пара и воды на линии насыщения; z - теплота парообразования; S_k - поверхность капли; α - коэффициент теплоотдачи, рассчитываемый по зависимости $Nu = 2 + 0,74 Re^{0,5} Pe^{0,43}$.

Для расчёта текущих значений диаметров капель d_i введена переменная Z_i , характеризующая долю испарившейся влаги в капле (во фракции) по отношению к её начальной массе m_{oiX} :

$$Z_i = \frac{m_{ки}}{m_{oiX}} = 1 - \left(\frac{d_i}{d_{oi}} \right)^3, \quad (4)$$

где $m_{ки}$ - масса испарившейся влаги в капле i -ой фракции.

Общую долю испарившейся влаги Z к текущему сечению канала

можно определить как

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^k Z_i M_{oi}}{M_{os}} \quad (5)$$

где M_{oi} - начальная масса i -ой фракции; M_{os} - начальная масса воды.

Из уравнения сохранения энергии парок капельного потока следует уравнение для расчёта энтальпии пара i_n в текущих сечениях канала

$$i_n = \frac{i_{on} + i' Z Q}{1 + Z Q} \quad (6)$$

где i_{on} и i' - энтальпия исходного пара и воды на линии насыщения.

Уравнение материального баланса потока даёт выражение для расчёта скорости пара w' в текущих сечениях:

$$w' = w_0 (1 + Z Q) \frac{\rho_{on}}{\rho_n} \quad (7)$$

К системе (1)...(7) для замыкания добавлены также известные термодинамические соотношения для перегретого пара.

Для решения составленной системы уравнений разработан алгоритм расчёта и составлена вычислительная программа для ЭВМ. В ходе расчётов процессы рассматриваются как последовательность переходов от состояния в момент времени τ , для которого известны значения параметров потока, к состоянию в следующий момент $\tau + \Delta\tau$ ($\Delta\tau$ - шаг расчётов). При этом расчёты осуществляются, как-бы продвигаясь вместе с фронтом формирующегося факела распыливания. Анализ траекторий движения капель позволяет оценить интенсивность орошения стенки канала водой на том или ином её участке. Полученные результаты послужили данными для описания граничных условий второй части задачи - задачи расчёта нестационарного температурного поля в стенке канала.

Четвёртая глава посвящена разработке методики расчёта нестационарного температурного поля в стенке канала пароскладителя. Для расчёта выбрана неявная схема метода балансов энергии, согласно которому исследуемая область разбивалась условно на пространственную сетку в виде кольцевых элементов.

Для произвольно взятого j, i -го элемента уравнение баланса энергии имеет вид:

$$Q_{j,i} - Q_{j,i} + Q_{j,i-1} - Q_{j,i+1} = Q_{j,i} \quad (8)$$

где $Q_{j,i}$, $Q_{j,i}$, $Q_{j,i-1}$ и $Q_{j,i+1}$ - подводимое и отводимое тепло по соответствующим направлениям элемента за время $\Delta\tau$; $Q_{j,i}$ - тепло, пошедшее на изменение теплосодержания элемента за время $\Delta\tau$.

После раскрытия слагаемых уравнения (8) и решения его относительно искомой температуры $t_{j,i}^{t+\Delta t}$ в узле j, i -го элемента получена основная расчётная зависимость вида

$$t_{j,i}^{t+\Delta t} = \frac{1}{1 + A_{j+1,i} + A_{j-1,i} + B_{j,i+1} + B_{j,i-1} + A_{j+1,i} t_{j+1,i}^{t+\Delta t} + A_{j-1,i} t_{j-1,i}^{t+\Delta t} + B_{j,i+1} t_{j,i+1}^{t+\Delta t} + B_{j,i-1} t_{j,i-1}^{t+\Delta t} + t_{j,i}^t}, \quad (9)$$

где $t_{j+1,i}^{t+\Delta t}$, $t_{j-1,i}^{t+\Delta t}$, $t_{j,i+1}^{t+\Delta t}$ и $t_{j,i-1}^{t+\Delta t}$ - температура в узлах соседних элементов; $A_{j+1,i}$, $A_{j-1,i}$, $B_{j,i+1}$ и $B_{j,i-1}$ - коэффициенты, зависящие от Δt и от величин, учитывающих особенности окрестностей j, i -го элемента. Выражение (9) следует рассматривать как систему алгебраических уравнений, число которых равно числу элементов схемы разбиения.

Для описания граничных условий на внутренней поверхности стенки предложена рабочая схема процесса орошения. Принято, что вся совокупность капель, выпадающая на поверхность того или иного элемента за единицу времени, воздействует на него не по одиночке и хаотично, а упорядоченно действующими группами (навесками капель). Каждая навеска содержит в себе столько капель, сколько их необходимо при однослойной укладке для покрытия всей поверхности элемента. Период этих упорядоченных воздействий по каждому из орошаемых элементов можно определить как $T = \Delta F / \Sigma S_k$, где ΔF - площадь лицевой стороны элемента; ΣS_k - сумма миделей всех капель, поступающих на поверхность элемента в течение секунды. До наступления определённых условий капельные навески после непродолжительного контакта с элементом отбрасываются от стенки и уносятся потоком, а до подхода следующей серии капель элемент омывается паровым потоком. Повторный контакт отброшенных капель со стенкой не учитывался.

Каждое взаимодействие капельных навесок с соответствующими элементами рассматривали как случай приведения в контакт двух тел с различными начальными температурами. Решение такой задачи даёт уравнение, используемое в модели для расчёта температуры контакта t_k на поверхности стенки, имевшей температуру $t_{ст}$:

$$t_k = t_n + \frac{t_{ст} - t_n}{1 + K_\epsilon}, \quad (10)$$

где $K_\epsilon = \sqrt{\frac{\lambda' c' \rho'}{\lambda_{ст} c_{ст} \rho_{ст}}}$ - критерий тепловой активности воды и стенки.

В промежутках между актами взаимодействия капельных навесок с элементами граничные условия описываются по коэффициенту теплоотдачи, определяемому по обычной методике. Модель, таким образом, предполагает пульсирующий съём тепла с каждого орошаемого элемента стенки с характерной для него периодичностью. Качественная картина этих процессов для двух элементов, расположенных на участках с различной плотностью орошения, показана на рис. 3.

К расчёту температур на горячей поверхности стенки, орошаемой потоком распыленной жидкости

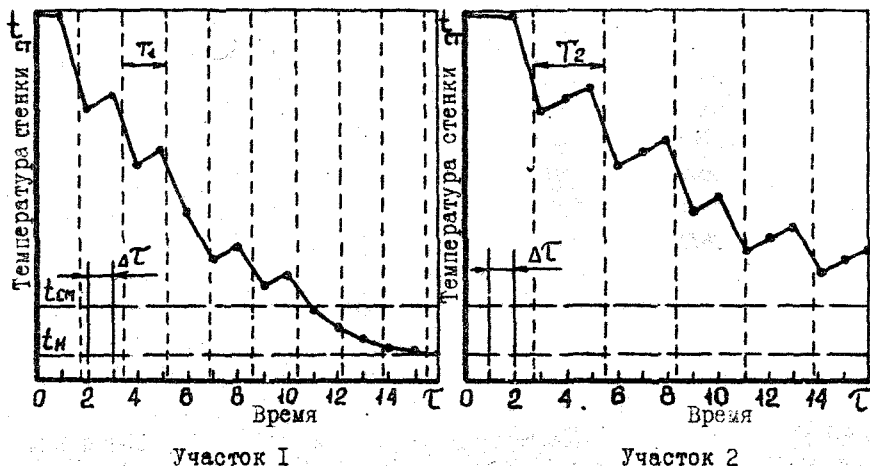


Рис. 3

Отбрасывание каплей от стенки в процессе её охлаждения происходит до тех пор, пока она не примет температуру $t_{сн}$, при которой поверхность начинает смачиваться водой. При дальнейшем орошении капли здесь будут растекаться и, сливаясь между собой, образуют жидкостную плёнку. Экспериментами установлено, что эта температура превышает температуру насыщения в канале пароохлаждителя на величину 30°C . Плёнка воды, образовавшаяся на участке с максимальной плотностью орошения, по мере накопления начинает растекаться под действием потока вдоль стенки, набегая на новые ещё не охлаждённые до температуры $t_{сн}$ участки. Эти и сопутствующие им процессы также нашли отражение в разработанной модели.

На основании изложенной методики и принятой модели процессов

разработан алгоритм и составлена программа расчёта на ЭВМ нестационарного температурного поля в стенке канала пароохладителя, взаимодействующей с парокапельным потоком. Полученные результаты по формированию температурного поля в исследуемой стенке интегрально отражают происходящие в канале пароохладителя процессы.

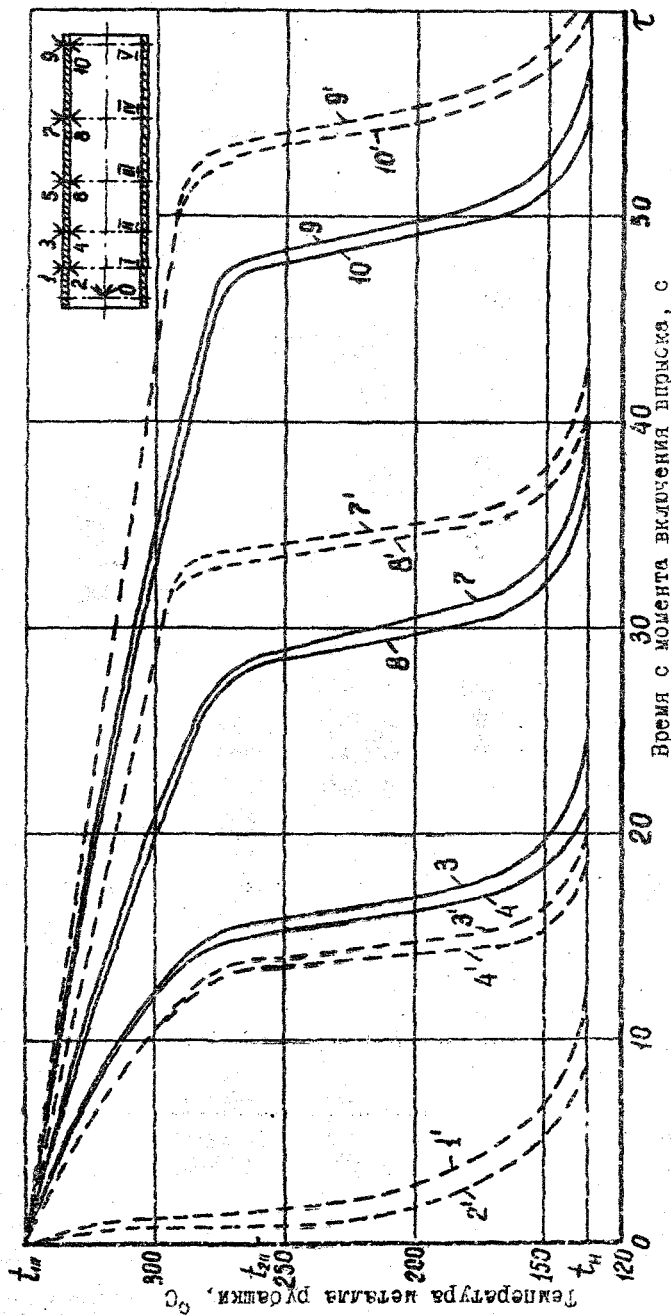
Разработанная математическая модель процессов пароохладителя реализована в виде единой вычислительной программы для ЭВМ, составленной из трёх состыкованных по входным и выходным параметрам автономных функциональных модулей: "Распыливание", "Поток" и "Стенка". Управление вычислительным процессом в программе осуществляется посредством вариации исходных данных, включающих в себя в каждом варианте задачи соответствующие конструктивные и режимные характеристики пароохладителя. Программа написана на алгоритмическом языке ФОРТРАН - IV и реализована в среде ОС ЕС ЭВМ.

В пятой главе обсуждаются результаты экспериментов, проводится сопоставление результатов расчётов, выполненных по разработанной методике, с данными экспериментов, рассматриваются вопросы практического использования проведенных исследований.

Температурный режим металла защитной рубашки пароохладителя определяется сложной функцией различных эксплуатационных факторов, обуславливающих в канале либо дисперсный, либо дисперсно-плёночный режим испарения охлаждающей воды. Плёнка на поверхности рубашки может находиться в виде сплошного кольцевого слоя воды или в виде отдельных ручейков, разделённых между собой сухими участками стенки с температурой, значительно превышающей температуру насыщения в канале. В случаях, когда длина рубашки недостаточна для испарения плёнки, она выпадает вновь за пределами рубашки на поверхности паропровода.

При углах раскрытия факела распыливания 85...105 градусов место возникновения плёнки (участок наибольшей плотности орошения) находится на удалении 120...250 мм от сечения впрыска. При скоростях пара 30...50 м/с, его температуре около 350 °С и размерах впрысков $q = 5...7$ % плёнка здесь возникает через 5...15 с с момента включения впрыска. Затем её передний край, набегая на новые участки, вызывает их резкое охлаждение. Эти процессы чётко просматриваются на полученных в опытах графиках (рис. 4). В общем случае скорость передвижения фронта плёнки зависит от температуры стенки, разогрев которой определяется температурой пара, ст. размера впрыска, а также скорости пара. В проведённых опытах она со-

Изменение температуры металла защитной рукашки
после включения впрыска



Сплошные линии - эксперимент; пунктирные - расчёт.

Параметры режима: $P_{\text{н}} = 0,3$ МПа; $t_{\text{пл}} = 353^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{эл}} = 260^{\circ}\text{C}$; $W_{\text{эл}} = 41,1$ м/с; $W_{\text{эл}} = 10,4$ м/с; $q = 7,06\%$.

Рис. 4

тавила величину 5...30 мм/с. На фронте плёнки скорость охлаждения металла достигает значений до 100 °С/с. Разность температур по толщине стенки рубашки ($\delta = 5$ мм) достигает 70...80 °С. На границах плёнки значительны также аксиальный градиент температур.

Разработаны мероприятия, направленные на совершенствование работы пароохладителей аварийного впрыска котлов ПК-4Г-Г, которые в существующем виде не способны были эффективно и надёжно выполнять возложенные на них функции. На основании результатов экспериментов и исследований, проведённых с помощью разработанной математической модели, был найден оптимальный вариант конструкции узла впрыска, в котором для распыливания воды предложено использовать центробежные форсунки, дающие более тонкий распыл по сравнению с ранее используемыми струйными форсунками. Геометрические характеристики их подобраны такими, чтобы они в заданных режимных условиях обеспечивали необходимый расход воды и качество её распыла, при которых исключалось бы выпадение плёнки на стенки паропровода. Опытно-промышленные испытания их на одном из котлов ПК-4Г-Г Кармановской ГРЭС, где эти разработки внедрены на всех котлах с экономическим эффектом 58,5 тыс. руб. в год, показали, что аварийный впрыск надёжно работает (без образования мокрого пятна на первом гйбе паропровода), начиная с нагрузки энергоблока 30 % и более, причём как в однокорпусном, так и в двухкорпусном режимах его эксплуатации. Допустимое охлаждение пара при 30 %-ой нагрузке блока составляет в двухкорпусном режиме работы котла 60 °С, а в однокорпусном - 80 °С, что с запасом отвечает требованиям, предъявляемым к работе аварийного впрыска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель процессов впрыскиваемого пароохладителя, учитывающая полидисперсность распыливания охлаждающей воды, взаимодействие её капель с потоком пара и горячей стенкой канала, образование, рост и движение на ней плёнки воды.

2. Численно решена сопряжённая задача теплообмена в канале пароохладителя со сложными граничными условиями. Решение задачи по разработанному алгоритму и составленной вычислительной программе для ЭВМ позволяет находить для заданных режимных параметров пароохладителя характеристики парскапельного потока по длине участка испарения и нестационарное поле температур в стенке канала.

3. Предложен метод описания граничных условий на поверхности горячей стенки, орошаемой потоком распыленной жидкости.

4. С целью получения данных о тепловом состоянии элементов пароохладителей, исследования протекающих в них процессов спроектирован и построен на Челябинской ТЭЦ-2 экспериментальный стенд с параметрами пара, близкими к рабочим параметрам натуральных пароохладителей систем промперегрева энергоблоков ТЭС.

5. Проведён комплекс экспериментальных исследований пароохладителей, позволивших получить важные сведения об условиях работы металла защитной рубашки и корпуса пароохладителя в установившихся и переходных тепловых режимах. Полученные данные могут служить исходным материалом для проведения термонапряжённого состояния металла элементов пароохладителей.

6. Сопоставление результатов расчётов, выполненных по разработанной методике, с данными экспериментов показало удовлетворительное качественное и количественное совпадение, что позволяет судить о правильности отражения в разработанной модели реальных процессов и возможности использования её для анализа процессов аналогичных пароохладителей.

7. Результаты проведенных исследований внедрены на Кармановской ГРЭС с экономическим эффектом 58,5 тыс. руб. в год.

8. Данные, полученные в ходе расчётно-экспериментальных исследований пароохладителей, используются Всесоюзным теплотехническим институтом им. Ф.Э. Дзержинского и Подольским машиностроительным заводом им. С.Орджоникидзе с целью совершенствования конструкций исследованного типа пароохладителей.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Короленко Ю.А., Форостов В.М., Юртаев М.А. К разработке математической модели впрыскивающего пароохладителя// Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Темат. сб. научн. тр./Челяб. политехн. ин-т.-Челябинск.-1981.-С. 83-89.

2. Форостов В.М., Короленко Ю.А., Юртаев М.А. К вопросу о работе впрыскивающих пароохладителей// Изв. вузов СССР: Энергетика.- 1981.- № II.- С. 43-47.

3. Черняк В.Н., Форостов В.М., Юртаев М.А. Температурный режим работы защитной рубашки впрыскивающего пароохладителя// Надёжность котельных поверхностей нагрева и актуальные вопросы теплообмена и гидравлики: Сб. тезисов докладов на выездном заседании секции Совета ГИИТ СССР.- Л.: РИО НТЮ ЦКТИ.- 1984.- С. 170-171.

4. А.с. 935674 (СССР). Впрыскивающий пароохладитель/ Форостов В.М., Юртаев М.А., Короленко Ю.А.- Заявл. 13.03.80, №2927242/24-06; Опубл. 15.06.82 в В.И., 1982, № 22, F 226 5/12.

5. Юртаев М.А. К вопросу разработки математической модели впрыскивающего парохладителя// Тезисы докладов VII Всесоюзной конференции "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах". - Т. III. - Л.: РИО НПО ЦКТИ. - 1985. - С. 161-162.

6. Форостов В.М., Юртаев М.А., Черняк В.Н. Исследование температурного состояния защитной рубашки впрыскивающего парохладителя// Тезисы докладов VII Всесоюзной конференции "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах". - Т. III. - Л.: РИО НПО ЦКТИ. - 1985. - С. 284-286.

7. Юртаев М.А., Форостов В.М., Черняк В.Н. Экспериментальное исследование температурного состояния защитной рубашки впрыскивающего парохладителя// Теплоэнергетика. - 1986. - № 4. - С. 69-71.

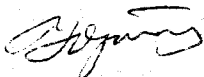
8. Форостов В.М., Юртаев М.А., Черняк В.Н. Некоторые результаты экспериментального исследования впрыскивающих парохладителей// Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Темат. сб. научн. тр./ Челябин. политехн. ин-т. - Челябинск. - 1985. - С. 70-73.

9. Юртаев М.А., Форостов В.М., Короленко Ю.А. Исследование впрыскивающих парохладителей методом математического моделирования// Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). - 1987. - № 7. - С. 81-84.

10. Юртаев М.А., Форостов В.М., Короленко Ю.А. Исследование температурного режима защитной рубашки впрыскивающего парохладителя// Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). - 1987. - № 9. - С. 62-66.

11. Юртаев М.А. Расчёт температурного поля защитной рубашки парохладителя в плёночных режимах// Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Темат. сб. научн. тр./ Челябин. политехн. ин-т. - Челябинск. - 1987. - С. 78-83.

Автор выражает глубокую благодарность доценту, кандидату технических наук Форостову В.М. за постоянное внимание, поддержку и большую помощь советами, консультациями в выполнении работы.



Подписано к печати 23.02.90. ФБ13084. Формат 60x90 1/16.

Печ. л. I. Уч.-изд. л. I. Тираж 100 экз. Заказ 158/278.

УОН ЧПИ. 454080. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.