

На правах рукописи



Федоров Алексей Иванович

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ, ВЫНОСНЫХ СОЛЕВЫХ ОТСЕКОВ
И ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ КОНТУРОВ БАРАБАННЫХ КОТЛОВ ТЭС**

Специальность 05.14.14 – «Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2021

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

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Григорьев Константин Анатольевич – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Открытого акционерного общества «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования имени И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»)

Ледуховский Григорий Васильевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой тепловых электрических станций федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ФГБОУ ВО «ИГЭУ»)

Чичирова Наталья Дмитриевна – доктор химических наук, профессор, директор Института теплоэнергетики, заведующая кафедрой тепловых электрических станций федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

Защита состоится "28" октября 2021 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д.222.001.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе Открытого акционерного общества «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» по адресу: 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, 14.

Диссертация размещена 28.06.2021 на официальном сайте ОАО «ВТИ» по адресу: www.vti.ru

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

Автореферат разослан « 24 » 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Д. В. Тарадай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Теплоэнергетика занимает лидирующие позиции в сфере производства электроэнергии и тепла, так как приблизительно 68 % установленных электрических мощностей приходится на ТЭС. Самыми распространенными являются барабанные котлы, которых установлено на ТЭС РФ более 1000 шт., включая котлы-утилизаторы ПГУ.

Ежегодно на барабанных котлах ТЭС отмечаются повреждения поверхностей нагрева, отказы и различные неполадки. Это вызвано многими причинами, в том числе и недостаточно глубокой изученностью физики процессов во внутрикотловых устройствах с их гидравлическим и теплохимическим режимом. В частности, методика расчета ступенчатого испарения недостаточно точно отражает распределение концентрации солей в ступенях испарения при двухсторонних солевых отсеках (СО) и при наличии перебросов котловой воды (КВ) из СО в чистые. В циркуляционных контурах котлов устанавливается ряд наружных трубопроводов, которые работают крайне неэффективно, например, линии солевой кратности (ЛСК), линии солевого выравнивания (ЛСВ). Недостаточно изучены рабочие процессы в СО, в особенности при наличии двух пар циклонов с каждой стороны котла и замкнутых, каждый, на одну экранную поверхность нагрева.

В сепарационных схемах котлов высокого давления (ВД) устанавливаются барботажно-промывочные устройства (БПУ), применение которых снижает надежность циркуляции за счет конденсации части пара экранов на листах БПУ. В то же время при нормируемом качестве питательной воды (ПВ) целесообразность применения БПУ требует расчетно-экспериментальной проверки.

Многие повреждения топочных испарительных поверхностей нагрева котлов ВД с односторонним обогревом факелом, пульсирующим характером циркуляции и наличием отложений на огневой части труб, были вызваны возникновением в них режимов с ухудшенным теплообменом, что требует новых экспериментальных исследований и обобщения имеющихся опытных данных.

Конструктивные решения ряда внутрикотловых схем КУ ПГУ, работающих с кратностями циркуляции $K < 5,0$, выполняются далеко не оптимальным образом и это приводит к тому, что экранные поверхности нагрева и сепарационные устройства (СУ) работают на КВ повышенного солесодержания.

Штатный химический контроль не всегда обеспечивает поддержание надежного водного режима и выявления солевых перекосов в барабанах и в СО.

В связи с этим для повышения надежности и эффективности работы барабанных котлов ТЭС актуальным является комплексное исследование гидравлического, температурного и солевого режимов в циркуляционных контурах, барабанах, различных конструкциях выносных СО и использование этих результатов при проектировании и эксплуатации котлов.

Степень научной разработанности проблемы. Исследованиями эффективности СУ барабанов, схем ступенчатого испарения, выносных СО и надежности циркуляционных контуров занимались и занимаются: Ромм Э.И. (ОАО «ВТИ»), Ноев В.Н. (ОАО «Фирма «ОРГРЭС»»), Стырикович М.А., Маргулова Т.Х. (МЭИ), Бузников Е.Ф. (ОАО «Центроэнергомонтаж»), Локшин В.А. (ОАО «ВТИ»), Балдина О.М. (ОАО «НПО ЦКТИ»), Батенко В.Ф. (ОАО «Фирма «ОРГРЭС»»), Сорокин Ю.Л., Беляков И.И., Акопьянц Б.Е. (ОАО «НПО ЦКТИ»), Горбуров В.И. (МЭИ).

В связи с тем, что почти на всех отечественных котлах ВД применяется ступенчатое испарение с выносными СО и барботажная промывка пара, неприменяемые в зарубежных котлах, практически все исследования по данным устройствам представлены в основном работами отечественных ученых, за исключением гидравлики циркуляционных контуров.

Значительное количество исследований внутрикотловых устройств, выполненные отечественными учеными, было проведено без учета влияния гидравлических режимов на солевой режим в этих устройствах. Недостатком такого подхода является недостаточно полное выявление всех особенностей процессов, протекающих в том или ином устройстве или контуре.

В то же время комплексные исследования гидравлического и солевого режимов в СУ барабанов и выносных СО, кроме того, выполненные на промышленных котлах, позволяют установить более полную физико-химическую картину в том или ином устройстве и на основе этого выявить ряд новых закономерностей и моделей процессов. На основании этого разработать более точные методики расчетов, эффективные внутрикотловые схемы и новые технические решения, направленные на повышение надежности барабанных котлов ТЭС.

Цель работы заключается в создании научных и методических основ процессов во внутрикотловых устройствах путем комплексных исследований гидравлических и теплехимических режимов и на их базе разработка методик расчета, моделей процессов, рекомендаций и технических решений по повышению надежной и эффективной работы СУ барабанов, выносных СО и циркуляционных контуров паровых котлов ТЭС.

Научная новизна. Разработана и экспериментально подтверждена уточненная методика расчета схем ступенчатого испарения с двухсторонними СО при перебросах из одного из них котловой воды в чистый отсек. На ее основе выполнен анализ и объяснены причины ненадежной работы котлов ТЭС.

Впервые на основании результатов исследования гидравлического и солевого режимов и статистической обработки пульсирующих циркуляционных характеристик разработана модель распределения концентрации солей в СО с двумя выносными циклонами на сторону котла, замкнутых, каждый на одну экранную поверхность нагрева.

Выполнены и обобщены исследования ЛСК и разработаны рекомендации и технические решения по эффективному их использованию.

Разработана и экспериментально проверена уточненная методика расчета ЛСВ в СО. Установлено, что ЛСВ при перекосах по теплу между левыми и правыми панелями СО не приводят к снижению солевых перекосов.

По результатам исследования обоснована целесообразность отказа от применения БПУ в котлах ВД при соблюдении норм ПТЭ по качеству ПВ.

Впервые на основе исследований внутрикотловых схем котлов доказано, что основное влияние на равномерность распределения концентрации солей в барабанах оказывают потоки из циркуляционных контуров, замкнутых на барабан, а влияние турбулентной диффузии примесей не является определяющим фактором.

На основании экспериментальных исследований и численного моделирования физических процессов в барабанах котлов установлено, что скорость турбулентной диффузии примесей меньше продольных скоростей воды в барабанах, вследствие чего снижение (возрастание) концентрации примесей «против потока» не происходит.

На основе исследований гидравлического и солевого режимов, а также численного моделирования физических процессов в водяном объеме барабанов котлов ТЭС разработана новая эффективная внутрикотловая схема для барабанных КУ ВД ПГУ без БПУ, работающая с $K < 5,0$.

Исследованы на котлах ВД и стендовых установках и обобщены условия обеспечения надежного температурного режима в топочных испарительных поверхностях нагрева с односторонним обогревом. На основании их, по условиям надежности для котлов с $P_0 = 15,2$ МПа обосновано увеличение допустимой кратности циркуляции с 4,0 до 4,5 для чистых отсеков и до 5,0 для выносных СО.

Реализация результатов работы. При разработке сепарационных устройств (СУ) для двух барабанов ВД без БПУ для КУ ПК-85 ПГУ Новогорьковской ТЭЦ.

При реконструкции СУ котла БКЗ-75-39 Сакской ТЭЦ для обеспечения надежной работы с солесодержанием ПВ $S_{пв} \leq 500$ мг/дм³ и $p \leq 5,0$ %.

При реконструкции внутрикотловых устройств чистых и выносных солевых отсеков на котлах ТПЕ-208 Череповецкой, Псковской ГРЭС и ТГ-104 Сургутской ГРЭС-1 для повышения их надежности и эффективности.

При разработке схемы температурного контроля экранов топки с применением температурных вставок ВТИ оригинальной конструкции на котле БКЗ-420-140 Ново-Зиминской ТЭЦ ОАО «Иркутскэнерго».

При разработке «Рекомендаций по наладке внутрикотловых сепарационных устройств барабанных котлов». СО 34.26.729 – реестр действующих в электроэнергетике НТД на 01.07.2003.

При разработке информационного письма № 4-89 СПО «Союзтехэнерго», 1989 «Опыт применения выносных циклонов с повышенной единичной паропроизводительностью».

Методология и методы диссертационного исследования. В диссертации использованы основные теоретические положения гидравлики, тепломассообмена в двухфазных средах, физической химии, также уравнения материального, солевого и теплового балансов. Численное моделирование задач гидравлики и тепломассообмена выполнялось средствами программного комплекса ANSYS Fluent. При исследовании применялись нестандартные методы измерения скоростей и температур в циркуляционных контурах паровых котлов принятых в ведущих научно-исследовательских организациях, в том числе безынерционные датчики перепада давления, которые позволили измерять пульсации скоростей, расходов и др.

На защиту выносятся: комплекс научно-методических положений, описывающий взаимосвязанные процессы гидравлического, температурного и солевого режимов в барабанах, выносных солевых отсеках (СО) и контурах, замкнутых на них. Этот комплекс научно-методических положений включает:

- уточненную методику расчета схем ступенчатого испарения с двухсторонними СО;
- уточненную методику расчета линий солевого выравнивания (ЛСВ) между СО;
- модель распределения концентрации солей в выносных СО имеющих по две пары выносных циклонов (ВЦ) на сторону котла и замкнутых, каждый, на одну экранную поверхность нагрева;
- результаты исследования СУ котлов ВД с БПУ, рекомендации и технические решения по сепарационной схеме без применения БПУ, при соблюдении норм качества ПВ;

– оптимальную внутрикотловую схему для КУ ПГУ без БПУ, работающую с небольшими кратностями циркуляции ($K \leq 5,0$) и разносом по длине барабана подвода ПВ и непрерывной продувкой;

– результаты исследования, анализ и оптимизацию места включения линий солевой кратности (ЛСК);

– результаты исследования, анализ и обоснование увеличения кратности циркуляции (K) с 4,0 до 4,5 для чистых отсеков и до 5,0 для СО для обеспечения надежности температурного режима в топочных испарительных поверхностях нагрева с односторонним обогревом в котлах с $P_6 = 15,2$ МПа;

– результаты исследования влияния параметров и режимов на надежность и обеспечение эффективности котлов: температуры питательной воды $t_{пв}$, давления, времени периодических продувок СО, подачи ПВ в линию ввода фосфатов в котел, неравномерности расходов газа на горелки.

Личный вклад автора. Руководство и непосредственное участие в проведении экспериментальных исследований на котлах ТЭС различных типов; разработка методики расчета схем ступенчатого испарения с двухсторонними СО; разработка методик исследования гидравлического, температурного и солевого режимов в циркуляционных контурах, барабанах, СУ и выносных СО; разработка уточненной методики расчета ЛСВ; разработка модели распределения концентрации солей в контуре ближнего и дальнего выносных циклонов (ВЦ) при наличии в СО двух пар ВЦ, замкнутых, каждый, на одну экранную поверхность нагрева; обобщение экспериментальных данных по исследованию гидравлического и солевого режимов в различных устройствах внутрикотловых схем; разработка технических и конструктивных решений различных элементов внутрикотловых устройств, для повышения надежности и эффективности работы котлов.

Достоверность и обоснованность результатов работы. Обоснованность и непротиворечивость научных положений исследования обеспечивается теоретической и методологической основой, которую составляют труды отечественных и зарубежных ученых. Подтверждением основных расчетно-аналити-

ческих положений экспериментальными данными автора и других исследователей. Достоверность результатов обуславливается использованием апробированных методик исследования и расчетов, верификацией разработанных математических моделей, с использованием результатов экспериментальных исследований гидравлического и теплехимического режимов в ВЦ и барабанах котлов.

Соответствие диссертации паспорту специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» по следующим направлениям исследования: п. 4 «Разработка конструкций теплового и вспомогательного оборудования и компьютерных технологий их проектирования и диагностирования»; п. 5 «Повышение надежности и рабочего ресурса агрегатов, систем и тепловых электростанций в целом»; п. 6 «Разработка вопросов эксплуатации систем и оборудования тепловых электростанций».

Апробация работы. Материалы исследований докладывались и получили положительную оценку: на VII Всесоюзной конференции «Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах, г. Ленинград, ОАО «НПО ЦКТИ», 23÷25 октября 1990 г.; на семинаре «Актуальные вопросы совершенствования эксплуатации энергетического оборудования электростанций и сетей, г. Москва, ОАО «Фирма «ОРГРЭС», 20÷24 октября 1998 г.; на Научно-практической конференции «Перспективные разработки ОАО «Фирма «ОРГРЭС», г. Москва, ОАО «Фирма «ОРГРЭС», 2001 г.; на Научно-технической конференции «Перспективные разработки ОАО «Фирма «ОРГРЭС», г. Москва, 30÷31 октября 2002 г.; на Научно-техническом семинаре «Водно-химические режимы и водоподготовка на ТЭС», г. Москва, ОАО «ВТИ», 6÷10 декабря 2004 г.; на Научно-техническом семинаре «Автоматизация химического контроля и управления установками водоприготовления и водно-химическими режимами ТЭС», г. Москва, ОАО «ВТИ», 1-2 марта 2006 г.; на конференции «Повышение ресурса работы поверхностей нагрева котлов», ОАО «Иркутскэнерго» 16÷17 ноября 2010 г.; на VIII Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования», г. Москва, МЭИ, 11-12 декабря 2013 г.; на V, VI и VII Международных научно-

технических конференциях «Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС. Цели и задачи», г. Москва, ОАО «ВТИ», 26÷28 мая 2015 г., 23÷25 мая 2017 г., 10 июня 2020 г.; на Международной научно-технической конференции «Проблемы эксплуатации котлов-утилизаторов парогазовых установок», г. Москва, ОАО «ВТИ», 26-27 апреля 2018 г.

По теме диссертации делались сообщения и доклады на ответственных производственных совещаниях энергокомпаний, на научно-технических советах ОАО «ВТИ».

Публикации по работе. Основное содержание выполненных исследований, научных и практических разработок изложено в 76 публикациях, в том числе в 35 статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и в их числе в 12 публикациях, рецензированных в международных базах данных Scopus, в четырех патентах на изобретение, одном учебно-методическом пособии, одном отраслевом нормативном документе.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 327 страницах машинописного текста, содержащих 132 рисунка и 27 таблиц, а так же списка цитируемой литературы из 183 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлена цель, показана ее новизна, практическая ценность и реализация результатов, даны сведения об апробации работы, публикациях, показан личный вклад автора и представлены результаты, вынесенные на защиту.

В первой главе приведен литературный обзор внутрикотловых устройств, схем барабанных котлов ТЭС и выполнен анализ их работы.

В котлах ВД имеется, как правило, несколько десятков циркуляционных контуров с подводами воды по опускным трубам и вводами среды в барабаны длиной до 25,5 м, в которых не просто равномерно распределить концентрации солей. В отличие от прямоточных котлов, часть примесей, поступающих в барабанный котел, можно вывести из водяного объема путем организации эффек-

тивной непрерывной и шламовой продувок. В отечественной энергетике, большинство котлов, выполняется со ступенчатым испарением КВ, которое позволяет, при одинаковом качестве ПВ, получать более чистый пар и меньшую скорость роста отложений на внутренней поверхности труб при меньших, чем при одноступенчатом испарении продувках. При расчетах схем ступенчатого испарения принимается, что солесодержание КВ последней ступени испарения равняется солесодержанию непрерывной продувки ($S_{\text{кв II(III)}} = S_{\text{н.пр}}$), а уравнения солевого баланса составляются как для односторонних СО, тогда как большинство двухсторонние. Это приводит к искажению распределения концентрации солей в ступенях испарения.

В сепарационных схемах котлов ВД устанавливаются БПУ, применение которых по всей видимости снижает надежность циркуляции за счет конденсации части пара экранов на листах БПУ. В то же время при высоком качестве питательной воды целесообразность применения БПУ требует расчетно-экспериментальной проверки.

Большинство котлов выполнены с выносными СО, которые в зависимости от мощности и схем включения ВЦ проектируются по одному, по два, по три выносных циклона на сторону котла. Гидравлический и солевой режимы в СО, имеющих по два или три циклона на сторону котла, гораздо сложнее, чем при одном циклоне на сторону и изучены недостаточно.

В котлах ТЭС реализованы различные варианты вывода непрерывной продувки из СО: из опускных труб, из ВЦ на отметке подвода подпитки, из нижнего коллектора циркуляционного контура, из ЛСВ, из ближних ВЦ при наличии двух пар ВЦ с последовательным питанием по воде. По принятой методике расчета ступенчатого испарения, все они должны обеспечивать надежный водный режим. Практика эксплуатации показывает, что это далеко не так.

На всех котлах ВД со ступенчатым испарением устанавливаются ЛСК и ЛСВ. Применение ЛСК облегчает приспособление внутрикотловой схемы к меняющимся при длительной эксплуатации водным условиям. ЛСВ были разработаны для выравнивания концентрации солей между двухсторонними СО.

Опыт применения ЛСК показал, что их эффективность очень низкая, что вызвано прежде всего с неправильным включением их в циркуляционные схемы котлов. Обследования ряда котлов ТГ-104 с ЛСВ, показали, что при перекосах по теплу между панелями, включенных в выносные СО, эти линии не устраняют солевые перекосы. Для устранения этих трудностей и корректировки имеющихся методик расчета ЛСК и ЛСВ необходимы были дополнительные исследования.

От места и количества отборов проб КВ в штатных схемах химконтроля зависит надежность водного режима. При разработке схем и оснащении котлов штатными отборами недостаточно учитывали особенности гидравлики и солевого режима во внутрикотловых устройствах.

При эксплуатации нередки случаи работы котлов ТЭС с соевыми перекосами, как по барабану, так и между правыми и левыми СО, — они приводят к снижению надежности. Основными причинами их возникновения являются перекосы по теплу поверхностей нагрева, недостатки коллекторов фосфатирования, нарушение гидравлики в барабане, например, из-за нерациональной схемы запитки циркуляционных контуров, перебросы среды из СО в ЧО, односторонние ЛСК и др.

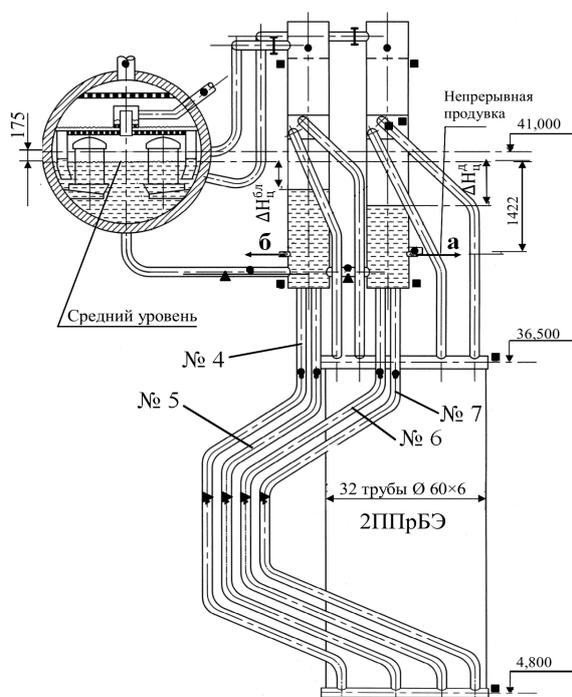
Разрешение приведенных выше проблем, разработка научно обоснованных методик расчета и моделей, оптимизация конструктивных решений и в конечном итоге на повышение надежности и эффективности гидравлического и теплохимического режимов являлись целью комплексных исследований, приведенных в диссертации.

Вторая глава посвящена комплексным исследованиям гидравлического и теплохимического режимов в барабанах, выносных СО, циркуляционных контурах и разработке на их основе методик расчета и моделей процессов.

Течение воды в барабанах энергетических котлов характеризуется небольшими продольными скоростями равными $0,84 \div 1,7$ см/с при $Re_{\delta} = 7,3 \div 13,0 \cdot 10^4$, а так как $Re_{\delta} > Re_{кр} = 1 \cdot 10^4$, то режим течения будет турбулентный. Выравнивание концентрации солей в барабане и выносных СО возможно

в результате: молекулярной, конвективной, турбулентной диффузии, перемешивание за счет потоков среды из циркуляционных контуров. При развитом турбулентном течении в барабане молекулярной и конвективной диффузией можно пренебречь ввиду их незначительности по сравнению с турбулентной диффузией.

При нарушении нормального гидравлического режима в барабане, например, из-за поступления части ПВ в район «действия» одной из труб питания СО, за счет разбавления КВ сначала возникает солевой перекоп в барабане, который передается в СО. Даже при очень небольших продольных скоростях воды в барабанах, равных $0,6 \div 0,8$ см/с, скорость турбулентной диффузии недостаточна для выравнивания концентрации солей по длине барабана.



▲ – скоростная трубка; ■ – отбор статического давления; ● – зонды для отбора проб пара или котловой воды; ┌ – измерительная диафрагма

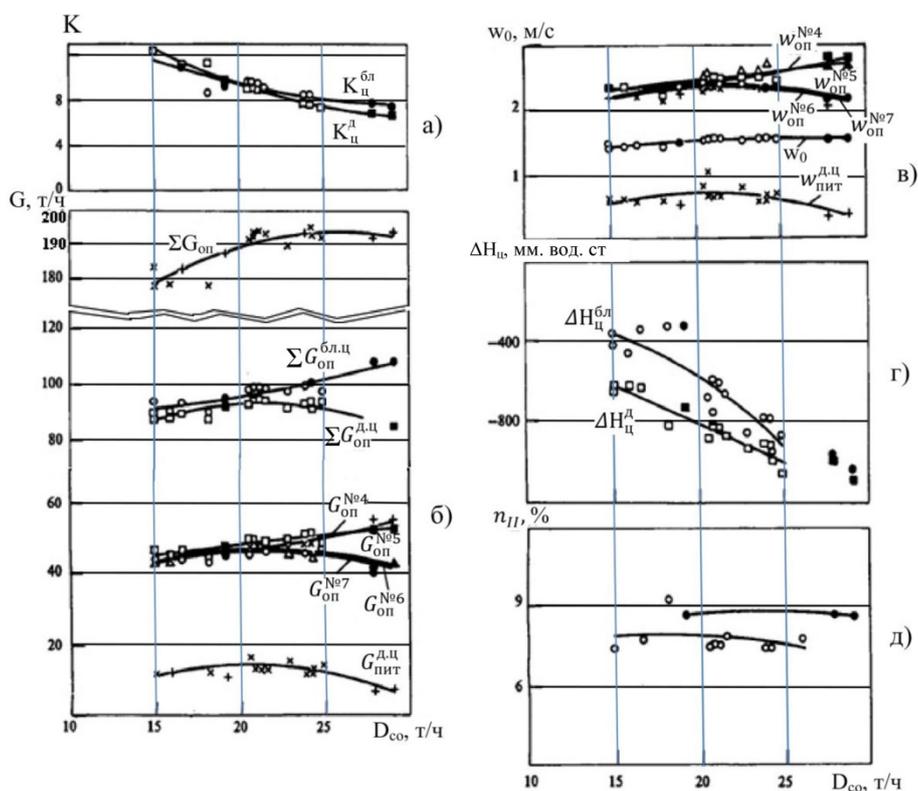
Рисунок 1 – Односторонний выносной солевой отсек котла ТПЕ-208 и расстановка устройств экспериментального контроля

Ежегодные обзоры надежности ТЭС свидетельствуют о повреждениях экранных труб выносных СО. Наибольшее количество повреждений возникает в СО с двумя парами ВЦ. На рисунке 1 показан выносной солевой отсек котла ТПЕ-208 и расстановка устройств экспериментального контроля. На рисунке 2 приведены циркуляционные характеристики СО этого котла в зависимости от паропроизводительности СО. На рисунке 3 приведены эти же характеристики, но в зависимости от времени, с записью показаний через 1 с в течении 5 мин при $D_k = 340$ т/ч, $D_{co} = 25$ т/ч, а в таблице 1 дана обработка этих пуль-

сирующих циркуляционных характеристик. На рисунке 4 показаны диаграммы распределения концентрации солей в СО. Из него видно, что их концентрация в контуре дальнего циклона существенно выше, чем у ближнего. Баланс солей

для котла ТПЕ-208 с условно трехступенчатым испарением, без учета выноса с паром, выражается следующим известным уравнением

$$(100 + p) \cdot S_{\text{пв}} = (n_{\text{II}} + n_{\text{III}} + p) \cdot S_{\text{кв I}} = (n_{\text{III}} + p) \cdot S_{\text{кв II}} = p S_{\text{н.пр}} \quad (1)$$



а – кратности циркуляции в контуре ближнего $K_{\text{ц}}^{\text{бл}}$ и дальнего $K_{\text{ц}}^{\text{д}}$ циклонов; *б* – расходы воды в питательной трубе дальнего циклона $G_{\text{пит}}^{\text{д}}$, в опускных трубах $G_{\text{оп}}^{\text{№4}}$, $G_{\text{оп}}^{\text{№5}}$, $G_{\text{оп}}^{\text{№6}}$, $G_{\text{оп}}^{\text{№7}}$; суммарный в опускных трубах ближнего $\Sigma G_{\text{оп}}^{\text{бл.ц}}$ и дальнего $\Sigma G_{\text{оп}}^{\text{д}}$ циклонов и солевого отсека $\Sigma G_{\text{оп}}$, т/ч; *в* – скорости циркуляции в опускных трубах ближнего $w_{\text{оп}}^{\text{№4}}$, $w_{\text{оп}}^{\text{№5}}$, дальнего циклонов $w_{\text{оп}}^{\text{№6}}$, $w_{\text{оп}}^{\text{№7}}$, в экранных трубах w_0 и питательной трубе дальнего циклона $w_{\text{пит}}^{\text{д}}$, м/с; *г* – уровни воды в ближнем $\Delta H_{\text{ц}}^{\text{бл}}$ дальнем $\Delta H_{\text{ц}}^{\text{д}}$, циклонах, мм. вод. ст.; *д* – n_{II} относительная паропроизводительность солевого отсека, %; \circ – газ, \bullet – уголь

Рисунок 2 – Циркуляционные характеристики солевого отсека котла ТПЕ-208 в зависимости от его паропроизводительности

Сопоставление кратностей упаривания $K_y^{\text{II}} = \text{PO}_4^{2\text{ст}} / \text{PO}_4^{1\text{ст}}$, рассчитанных как для трехступенчатой схемы испарения, с действительными кратностями $K_y^{\text{II(d)}}$ для ближнего циклона, показывает, что $K_y^{\text{II(d)}}$ в $1,83 \div 2,2$ выше чем, если бы котел был выполнен по трехступенчатой схеме. Повышенная концентрация солей в ближнем циклоне вызвана перетоками КВ из дальнего циклона в ближ-

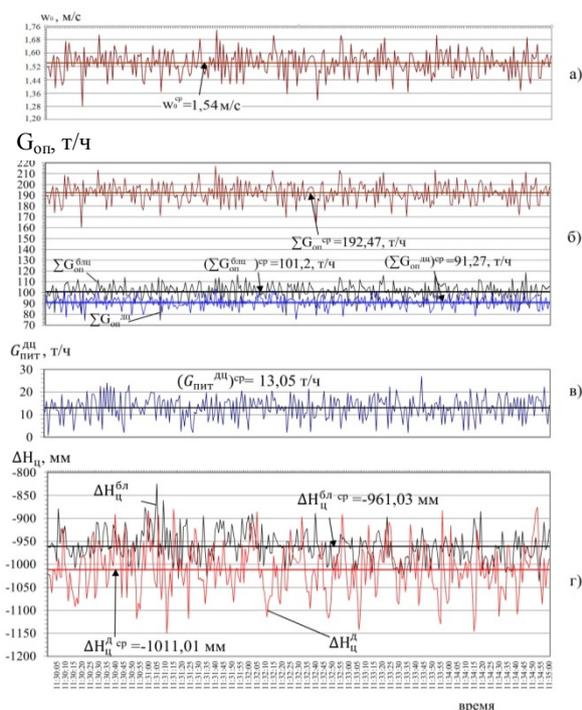
ний. На основании уравнения солевого баланса с перебросом из дальнего в ближний циклон

$$(n_{III} + p + r) \cdot S_{квII} = (p + r) \cdot S_{н.пр} \quad (2)$$

относительный переброс будет равен

$$r = \frac{n_{III}}{K_y^{III} - 1} - p \quad (3)$$

где $r = \frac{D_{пер}}{D_k} \cdot 100\%$, $K_y^{III} = \frac{PO_4^{н.пр}}{PO_4^{2ст}}$.



$D_k = 340$ т/ч, $P_6 = 14,7$ МПа, $D_{со} = 25$ т/ч, время 11³⁰÷11³⁵ (обозначения на рисунке 1) Рисунок 3 – Циркуляционные характеристики солевого отсека в зависимости от времени

На рисунке 5 приведена зависимость абсолютного переброса КВ из третьей ступени во вторую от D_k . Значение переброса рассчитано по солевому балансу и на основании статистической обработки пульсирующих циркуляционных характеристик. Модель распределения концентрации солей в симметричных СО, имеющих по два ВЦ и замкнутых, каждый СО на общую экранную поверхность нагрева с верхним и нижним коллекторами без перегородок. Концентрация солей распределяется таким образом, что в контуре ближнего циклона (условно вторая ступень испарения) она

приблизительно в 2 раза выше, чем была бы во второй ступени при трехступенчатой схеме испарения КВ, а в контуре дальнего циклона концентрация приблизительно в 3 раза выше, чем в контуре ближнего циклона. Повышенная концентрация в контуре ближнего циклона вызвана перебросом в него части

КВ контура дальнего циклона по экранным трубам, число которых изменяется вследствие циркуляционных пульсаций.

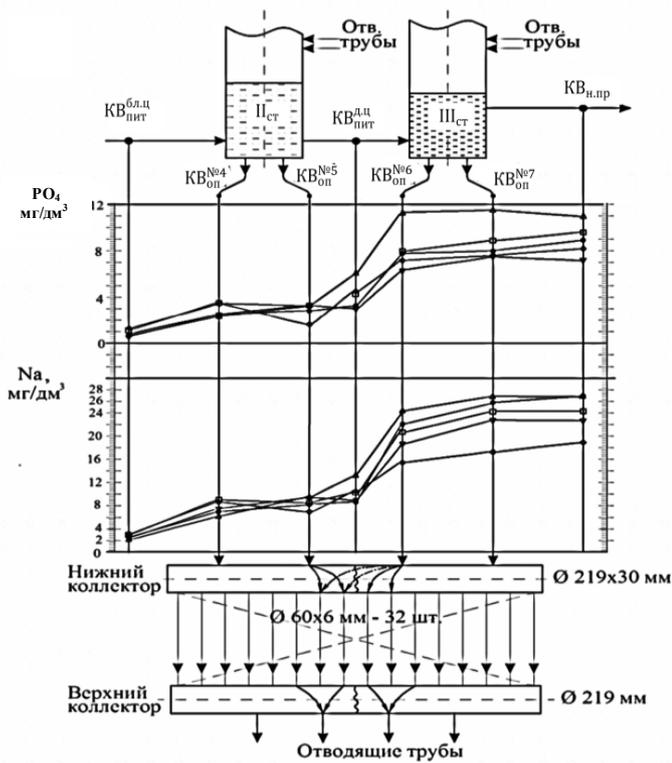
Таблица 1 – Результаты обработки пульсирующих циркуляционных характеристик солевого отсека $D_k = 340$ т/ч, $D_{co} = 25$ т/ч, $P_6 = 14,42$ МПа, время $11^{30}-11^{35}$, запись показаний – 1 с, количество измерений – 300

Наименование параметра	Обозначения	Среднеарифметическое значение	Максимальное и минимальное истинные значения параметра		Максимальное и минимальное значения пульсационной составляющей	Среднеквадратичное отклонение, σ	Степень пульсации, ε , %	Средняя частота пульсаций, кол/мин (Гц)
			max	min				
Расход воды в опускных трубах солевого отсека	$\Sigma G_{оп}$ т/ч	192,47	max	217,16	24,69	9,27	4,82	18,4 (0,307)
			min	160,29	-32,18			
Расход воды через ближний циклон	$\Sigma G_{оп}^{бл.ц}$ т/ч	101,2	max	118,18	16,98	7,3	7,21	16,2 (0,27)
			min	74,52	-26,68			
Расход воды через дальний циклон	$\Sigma G_{оп}^{дл.ц}$ т/ч	91,27	max	103,83	12,56	5,41	5,93	16,2 (0,27)
			min	74,14	-17,13			
Расход воды через пит. трубу дальнего циклона	$G_{пит}^{дл.ц}$ т/ч	13,05	max	26,98	13,93	5,13	39,31	18,4 (0,307)
			min	0,78	-12,27			
Уровень воды в ближнем циклоне	$\Delta H_{ц}^{бл.ц}$ мм	-961,03	max	-1036,7	-75,67	33,5	3,49	12,8 (0,213)
			min	-824,6	136,43			
Уровень воды в дальнем циклоне	$\Delta H_{ц}^{дл.ц}$ мм	-1011,01	max	-1150,2	-139,19	53,89	5,33	13,4 (0,233)
			min	-875,7	135,31			
Средняя скорость циркуляции в экранных трубах	$w_{ср}^3$ м/с	1,5	max	1,7	0,193	0,07	4,54	18,4 (0,307)
			min	1,25	-0,25			

В связи с тем, что на БПУ, как правило, подается вода, недогретая до t_s , то часть пара, проходящая через эти устройства конденсируется в слое промывочной воды

$$G_k = \frac{(D_k + D_{н.пр}) \cdot c(i' - i''_{пв})}{r} \quad (4)$$

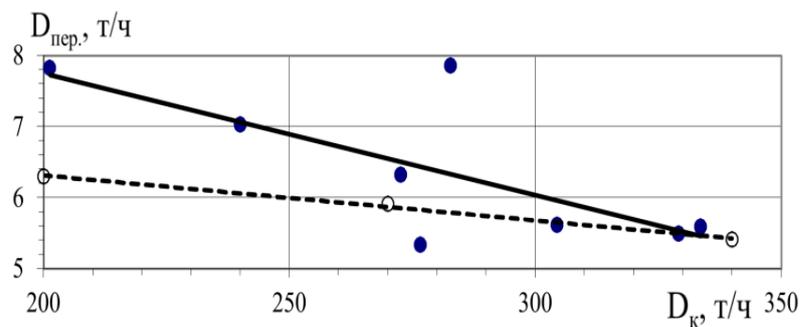
где c – доля ПВ, подаваемая на БПУ; $i''_{пв}$ – энтальпия ПВ после ВЭ.



Δ – $D_k = 323$ т/ч, $D_{co} = 27,9$ т/ч, $P = 0,5\%$; ∇ – $D_k = 273$ т/ч, $D_{co} = 21,5$ т/ч, $P = 0,77\%$;
 \square – $D_k = 198$ т/ч, $D_{co} = 15,0$ т/ч, $P = 1,1\%$; \diamond – $D_k = 272$ т/ч, $D_{co} = 20,8$ т/ч, $P = 1,0\%$;
 \circ – $D_k = 332$ т/ч, $D_{co} = 24,3$ т/ч, $P = 0,49\%$

$KВ_{пит}^{бл.д.}$, $KВ_{пит}^{дл.д.}$, $KВ_{оп}^{№4}$, $KВ_{оп}^{№5}$, $KВ_{пит}^{дл.д.}$, $KВ_{оп}^{№6}$, $KВ_{оп}^{№7}$, $KВ_{н.пр.}$ – концентрации Na и PO_4 , в воде питания ближнего и дальнего циклона, опускных трубах №№ 4–7 и непрерывной продувке

Рисунок 4 – Распределение концентрации солей в солевом отсеке котла ТПЕ-208



● – по фосфатам; ○ – среднеквадратичное отклонение расхода воды в опускных трубах дальнего циклона

Рисунок 5 – Зависимость абсолютного перетока котловой воды из третьей ступени во вторую от паропроизводительности котла

С учетом этого паропроизводительность экранов равна

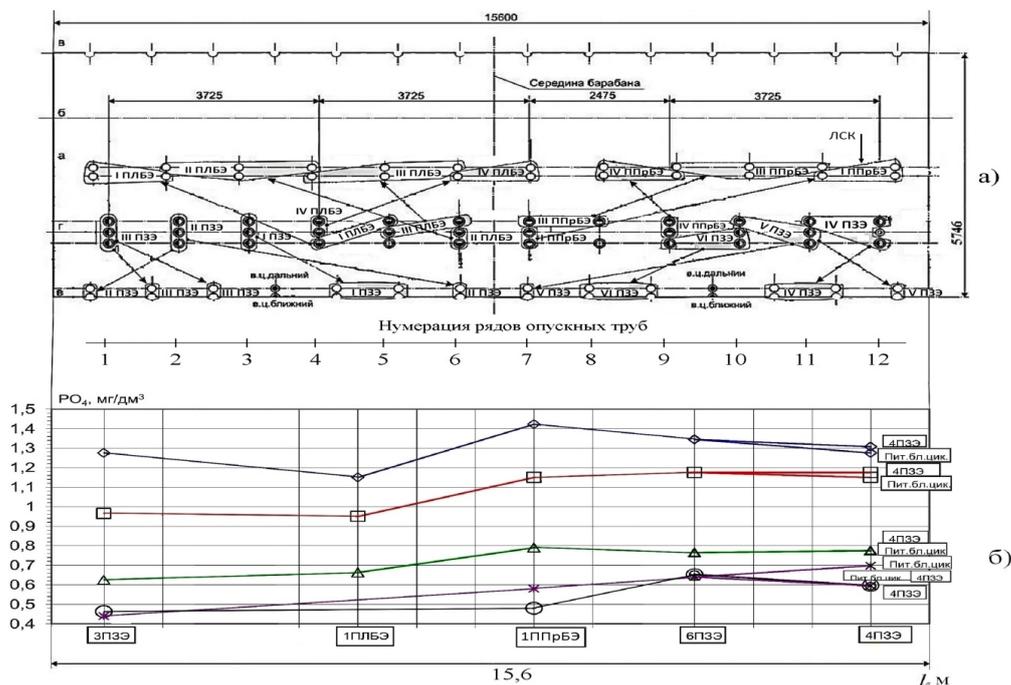
$$\Sigma D_3 = D_k + G_k \quad (5)$$

Из уравнения солевого баланса циркуляционного контура можно получить

$$\frac{S_{\text{КВ}}^3}{S_{\text{ОП}}} = \frac{K_3}{K_3 - 1} \quad (6)$$

Из (6) при $K_3 = 2$ отношение $S_{\text{КВ}}^3/S_{\text{ОП}} = 2$, а при $K_3 = 4 - 1,33$.

На рисунке 6 приведена схема запитки циркуляционных контуров котла ТПЕ-208 и распределение концентрации солей. Равномерность распределения концентрации солей в барабане и в циркуляционных контурах зависит: от сепарационной схемы барабана, от схемы подвода и распределения питательной и промывочной воды на БПУ, от равномерности раздачи фосфатов по длине барабана, от разноса по длине барабана места входа воды в опускные трубы и ввода среды в барабан; при этом чем больше расстояние и количество этих перебросов, тем равномернее распределяется концентрация солей в барабане, а значит и в циркуляционных контурах.



а – развертка барабана: \odot , \ominus , \circ , \otimes – опускные, отводящие и труба питания CO ; \rightarrow – переброс среды от места запитки опускных труб до ввода среды отводящими трубами; l_6 , м – длина барабана; б – распределение концентрации PO_4 ;

\diamond – $D_k = 198$ т/ч, $P_6 = 13,3$ МПа, $p = 1,1$ %, $Na_{\text{ПВ}} = 2$ mg/dm^3 ; \square – $D_k = 272$ т/ч, $P_6 = 13,8$ МПа, $p = 0,98$ %, $Na_{\text{ПВ}} = 2$ mg/dm^3 ; Δ – $D_k = 332$ т/ч, $P_6 = 14,4$ МПа, $p = 0,49$ %, $Na_{\text{ПВ}} = 2,5$ mg/dm^3 ; \circ – $D_k = 273$ т/ч, $P_6 = 14,1$ МПа, $p = 0,77$ %, $Na_{\text{ПВ}} = 3$ mg/dm^3 ; \ast – $D_k = 323$ т/ч, $P_6 = 14,3$ МПа, $p = 0,59$ %, $Na_{\text{ПВ}} = 6,5$ mg/dm^3

Рисунок 6 – Схема запитки циркуляционных контуров и распределение концентраций солей по длине барабана котла ТПЕ-208

Экспериментально установлено, что турбулентная диффузия не является определяющим фактором выравнивания концентрации солей по барабану.

Рекомендации по проектированию циркуляционных схем запитки барабанов:

- избегать расположения входа воды в опускные трубы и ввода ПВС в одном вертикальном сечении барабана;
- применять перебросы среды от места запитки до ввода в барабан на расстояние 2÷3 продольных шагов между рядами опускных труб.

При оценке надежности температурного режима экранных испарительных поверхностей нагрева и выборе минимально допустимого значения кратности циркуляции (К) следует учитывать пульсирующий характер циркуляции, который может приводить к колебанию К в пределах ± 1 .

До сих пор при расчетах схем ступенчатого испарения условно принимается, что СО как бы односторонние. На рисунке 7 показан котел с двухступенчатым испарением и с односторонним СО для которого уравнения солевого баланса с перебросом запишутся (без учета выноса солей с паром):

$$(100 + p) \cdot S_{ПВ} = p \cdot S_{КВ II} \quad (7)$$

$$(100 + p) \cdot S_{ПВ} + r \cdot S_{КВ II} = (r + n_{II} + p) \cdot S_{КВ I} = (r + p) \cdot S_{КВ II} \quad (8)$$

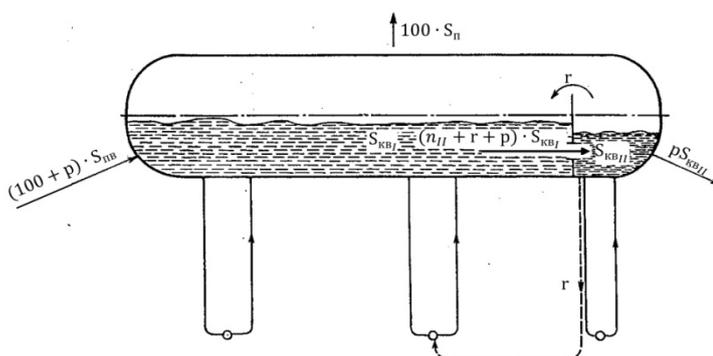


Рисунок 7 – Схема котла с двухступенчатым испарением котловой воды при перебросе из второй ступени в первую (односторонний солевой отсек)

Большинство котлов выполняются с двухсторонними СО, показанными на рисунке 8.

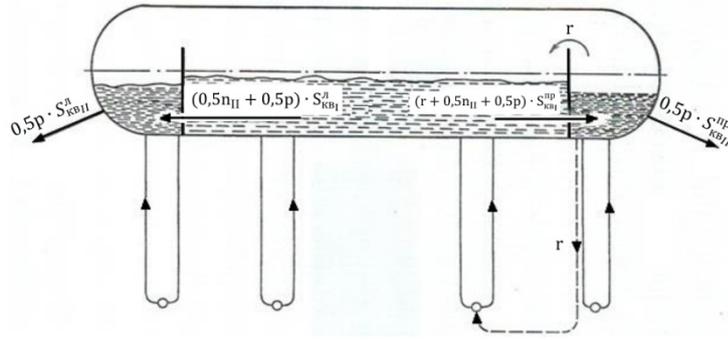


Рисунок 8 – Схема котла с двухступенчатым испарением и двухсторонними солевыми отсеками при перебросе только из правого солевого отсека

Уравнения солевого баланса при перебросе, например, из правого СО запишутся:

$$(100 + p) \cdot S_{пв} = 0,5 \cdot p \cdot S_{квII}^L + 0,5 \cdot p \cdot S_{квII}^{np} \quad (9)$$

$$(100 + p) \cdot S_{пв} + r^{np} \cdot S_{квII}^{np} = (r^{np} + 0,5n_{II} + 0,5p) \cdot S_{квI}^{np} + (0,5n_{II} + 0,5p) \cdot S_{квI}^L \quad (10)$$

для левого СО:

$$(0,5n_{II} + 0,5p) \cdot S_{квI}^L = 0,5p \cdot S_{квII}^L \quad (11)$$

для правого СО:

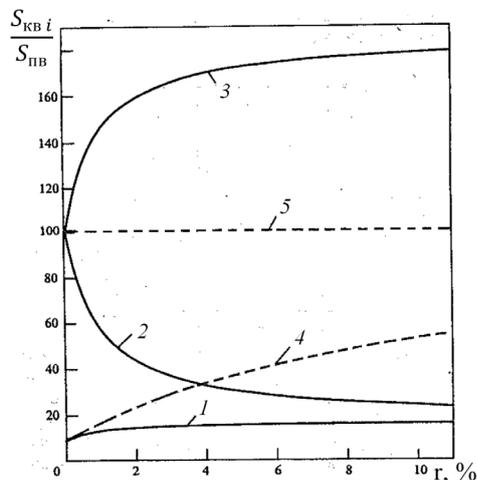
$$(r^{np} + 0,5n_{II} + 0,5p) \cdot S_{квI}^{np} = (r^{np} + 0,5p) \cdot S_{квII}^{np} \quad (12)$$

Возможны следующие основные режимы работы: 1) без переброса воды из СО в ЧО; 2) с одинаковым перебросом из СО в ЧО; 3) с перебросом из одного СО в ЧО; 4) с перебросом из обоих СО, но $r^L \neq r^{np}$; 5) с $n_{co}^L \neq n_{co}^{np}$; 6) с $S_{квI}^L \neq S_{квI}^{np}$.

По принятой ныне методике можно рассчитать внутрикотловую схему только для режимов 1 и 2, для режимов 3÷6 она неприменима.

По (7)÷(12) построены зависимости, показанные на рисунке 9. Из этих зависимостей видно, что существующая методика не отражает реального распределения концентрации солей между ЧО и двухсторонними СО. При перебросе из одностороннего СО происходит 100 % возврат расхода переброса обратно в СО и количества солей, вынесенных из СО. При перебросе только из одного СО у двухсторонних СО осуществляется 100 % возврат расхода переброса, не-

полный возврат количества солей, так как часть солей переброса уходит в другой СО. Солевой перекоп между ступенями испарения возникает, из-за того, что в СО с перебросом, возвращаются не все соли, которые «ушли» из него равным $\gamma^{пр} \cdot S_{квII}^{пр}$. Невозврат солей в такой СО — это как бы дополнительная его



— двухсторонний отсек с перебросом только из правого СО: 1 — чистый; 2, 3 — правый и левый СО; ---- односторонний СО: 4 — чистый; 5 — солевой
Рисунок 9 – Зависимость кратности упаривания в ступенях испарения от перебрса воды из солевого отсека в чистый

продувка. Концентрация солей в нем становится меньше, чем при схеме без переброса равная $S_{квII} = ((100 + p)/p) \cdot S_{пв}$. Разработанная в диссертации методика расчета схем ступенчатого испарения позволяет учитывать:

- наличие двух симметричных отсеков, в том числе имеющих по два ВЦ, замкнутых каждый на одну экранную поверхность;
- наличие и схемы включения линий солевой кратности и выравнивания (ЛСК, ЛСВ);
- места вывода непрерывной продувки;
- наличие перебросов между солевым и чистым (ЧО) отсеками и др.

На рисунке 10 показан выносной СО с различными вариантами включения ЛСК и ЛСВ. На рисунке 11 приведены результаты исследования ЛСК Ø 60×6 мм на котле ТПЕ-208 с односторонним солевым отсеком. Их анализ показал, что эффективность ЛСК определяется количеством фосфатов забираемых из СО и вводимых в ЧО, равным $G_{ЛСК} \cdot PO_4^{со}$. Низкая эффективность работы ЛСК на ряде котлов объясняется, прежде всего, тем, что забор КВ выполнялся из ближних по ходу воды циклонов, где концентрация PO_4 приблизительно в 2,5 раза ниже, чем в дальних. Применение эффективно работающей ЛСК позволяет: снизить ступенчатость испарения, уменьшить подачу фосфатов в котел, снизить темп отложения железофосфатных накипей в СО.

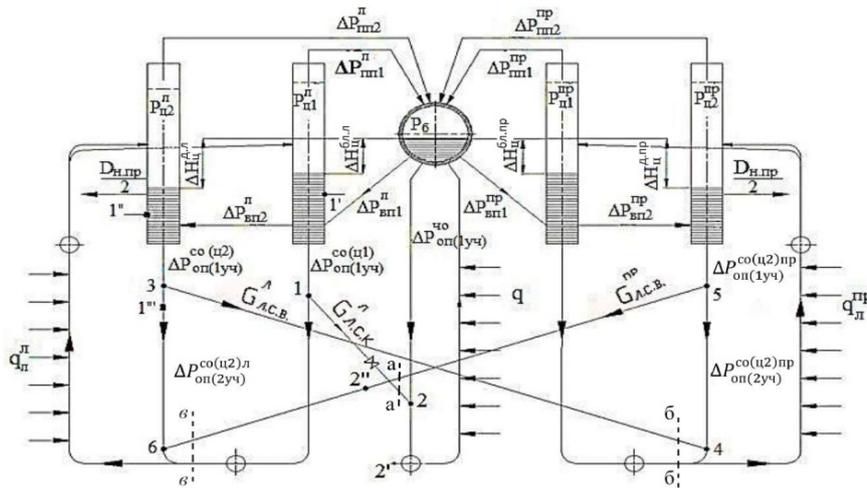
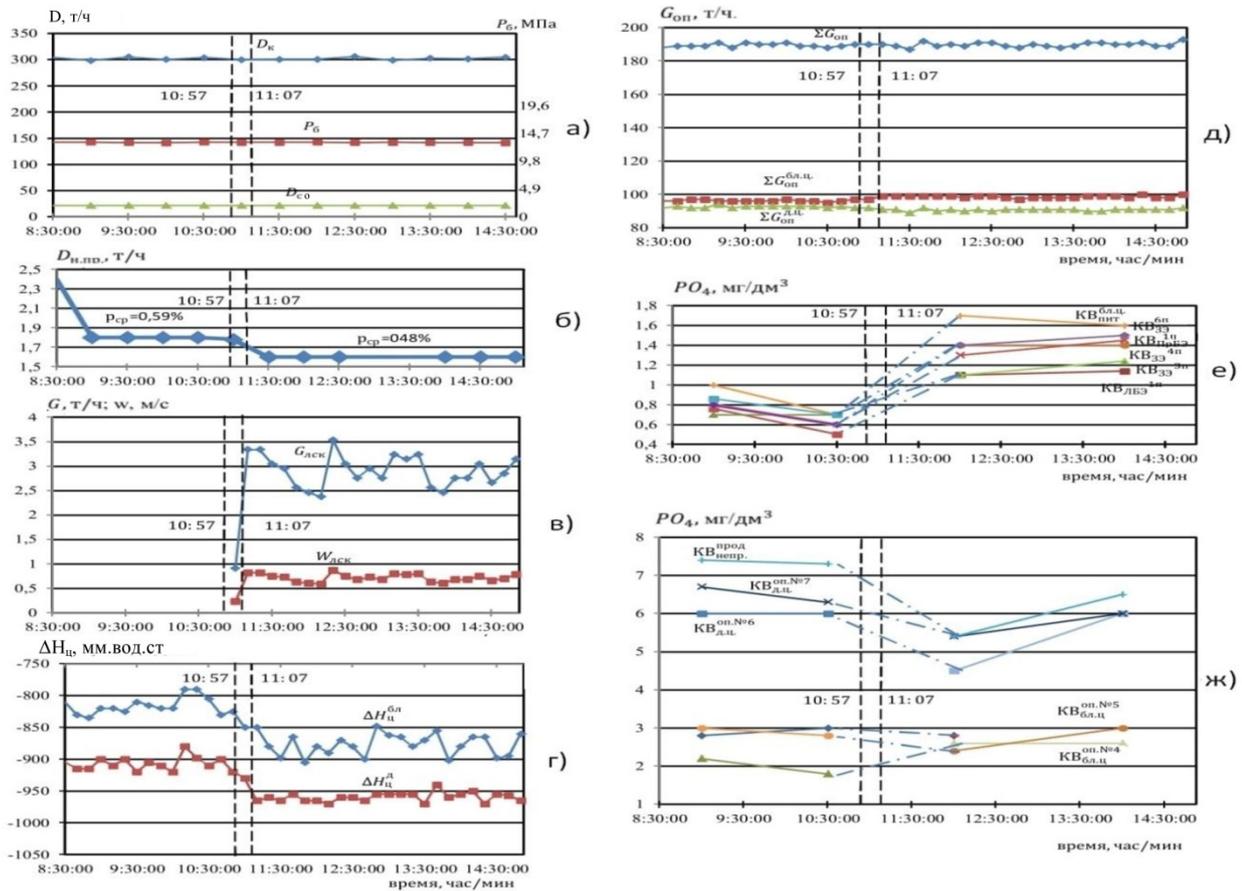


Рисунок 10 – Выносной солевой отсек котлов высокого давления, с линиями солевой кратности и выравнивания концентраций солей



a – D_k , D_{CO} , P_6 ; *б* – $D_{н.пр}$; *в* – скорость циркуляции и расход в ЛСК $w_{лск}$, м/с, $G_{лск}$, т/ч; *г* – уровни воды в ближнем и дальнем циклонах $\Delta H_{ц}^{бл}$, $\Delta H_{ц}^д$, мм; *д*) – расходы воды в СО, т/ч; *е*, *ж* – концентрация PO_4 в мг/дм³ в чистом и СО; 8³⁰÷10⁵⁷ ЛСК закрыта; 11⁰⁷÷15⁰⁰ ЛСК открыта

Рисунок 11 – Результаты исследования гидравлики и солевого режима на котле ТПЕ-208 с односторонним солевым отсеком, линией солевой кратности при ее отключении и включении ($G_{лск} \approx 3,0$ т/ч, $Z_p \approx 1,0\%$)

На основании исследования на котле ТПЕ-208 (рис. 11, е) установлено, что при включении ЛСК, повышение концентрации PO_4 в ЧО, составляет приблизительно 60 мин. Это обусловлено, прежде всего, организацией «правильной» гидравлики в барабане за счет перебросов среды от места запитки до ввода в барабан на расстояние 2÷3 продольных шагов между рядами опускных труб.

Для повышения надежности СО и снижения годовых расходов фосфатов проектировать ЛСК с долей рециркуляции $Z_p = 1,0 \div 2,0 \%$ ($Z_p = (G_{лск} / D_k) \cdot 100 \%$) с забором в них воды из зон с наивысшей концентрацией солей в СО (из ВЦ выше трубы питания). Если СО выполнены с двумя парами ВЦ с каждой стороны котла, то забор из дальнего по ходу воды ВЦ. Для исключения солевых перекосов между СО ЛСК должны быть двухсторонними и симметричными. Для исключения солевых перекосов по длине барабана отвод воды из ЛСК должен выполняться в нижние коллекторы панелей ЧО, при односторонних СО в панель экрана, которая заводит пароводяную смесь (ПВС) в торец барабана, противоположной трубе питания СО, при двухсторонних СО, в левую и правую половины барабана, на расстоянии приблизительно четверти его длины.

Опыт эксплуатации линий солевого выравнивания (ЛСВ) в котлах с выносными СО показал, что ЛСВ не устраняют солевые перекосы при перекосах по теплу между левыми и правыми панелями СО. В методике расчета РТМ 108.030.05-75 перепад между точками подключения ЛСВ приравнивается сопротивлению участка опускной трубы СО, между точками 3 и 6 для левой ЛСВ и точками 5 и 4 для правой ЛСВ на рисунке 10, то есть

$$\Delta P_{лсв}^л = \Delta P_{оп(2уч)}^{со(ц_2)л}, \quad \Delta P_{лсв}^{пр} = \Delta P_{оп(2уч)}^{со(ц_2)пр}. \quad (13)$$

Проверим правильность формулы (13). На основании уравнений гидравлики для циркуляционных контуров котла перепад давления между точками 3 и 4, место подключения левой ЛСВ, после преобразования будет равен:

$$P_3 - P_4 = \Delta P_{оп(2уч)}^{со(ц_2)пр} + \left(\Delta P_{оп(уч1)}^{со(ц_2)пр} - \Delta P_{оп(уч1)}^{со(ц_2)л} \right) + \left(\Delta P_{вп1}^{пр} - \Delta P_{вп1}^л \right) + \left(\Delta P_{вп2}^{пр} - \Delta P_{вп2}^л \right) \quad (14)$$

Для правой ЛСВ, подключенной между точками 5 и 6

$$P_5 - P_6 = \Delta P_{\text{оп}(2\text{уч})}^{\text{co}(\text{ц}_2)\text{л}} + \left(\Delta P_{\text{оп}(1\text{уч})}^{\text{co}(\text{ц}_2)\text{л}} - \Delta P_{\text{оп}(1\text{уч})}^{\text{co}(\text{ц}_2)\text{пр}} \right) + \left(\Delta P_{\text{вп1}}^{\text{л}} - \Delta P_{\text{вп1}}^{\text{пр}} \right) + \left(\Delta P_{\text{вп2}}^{\text{л}} - \Delta P_{\text{вп2}}^{\text{пр}} \right) \quad (15)$$

При перекосе по теплу, например, при $q_{\text{л}} > q_{\text{пр}}$, $D_{\text{со}}^{\text{л}} > D_{\text{со}}^{\text{пр}}$, $\Delta P_{\text{оп}(1\text{уч})}^{\text{co}(\text{ц}_2)\text{л}} > \Delta P_{\text{оп}(1\text{уч})}^{\text{co}(\text{ц}_2)\text{пр}}$,

$$\Delta P_{\text{оп}(2\text{уч})}^{\text{co}(\text{ц}_2)\text{л}} > \Delta P_{\text{оп}(2\text{уч})}^{\text{co}(\text{ц}_2)\text{пр}}, \quad \Delta P_{\text{вп1и2}}^{\text{л}} > \Delta P_{\text{вп1и2}}^{\text{пр}}, \quad \text{следовательно } P_5 - P_6 > P_3 - P_4,$$

а $G_{\text{лсв}}^{\text{пр}} > G_{\text{лсв}}^{\text{л}}$ и $\Delta G_{\text{лсв}} = G_{\text{лсв}}^{\text{пр}} - G_{\text{лсв}}^{\text{л}}$. Из-за этого в левый СО из правого будет приходить больше воды, чем уходит из него. Нарушение материального баланса устраняется за счет снижения подпитки в этот циклон по трубе питания. В правом СО из-за снижения $D_{\text{со}}^{\text{пр}}$ и условно большей продувки на $\Delta G_{\text{лсв}}$ концентрация солей снижается. В левом СО концентрация будет увеличиваться за счет того, что на $\Delta G_{\text{лсв}}$ уменьшится расход воды по трубе питания из предвключенного циклона с менее засоленной водой, а так же из-за увеличения $D_{\text{со}}^{\text{л}}$ и подачи на $\Delta G_{\text{лсв}}$ КВ из дальнего правого циклона. Дополнительное количество солей, которое вводится в левый СО будет равно:

$$\Delta G_{\text{лсв}} \cdot (S_{\text{квIII}}^{\text{пр}} - S_{\text{квII}}^{\text{л}}) \quad (16)$$

где $S_{\text{квIII}}^{\text{пр}}$, $S_{\text{квII}}^{\text{л}}$ – концентрация солей в правом дальнем циклоне (Ц_2) и в левом ближнем циклоне (Ц_1), причем $S_{\text{квIII}}^{\text{пр}}/S_{\text{квII}}^{\text{л}} \approx 2 \div 3$.

Уточненная в работе методика расчета ЛСВ показала, что эти линии не приводят к снижению солевых перекосов между СО при перекосах по теплу, а наоборот их увеличивают и вызвано это тем, что при обосновании применения ЛСВ в СО лежат представления, не учитывающие условия естественной циркуляции в контурах с двухсторонними СО, на которые замкнуты ЛСВ. Для СО с одним циклоном на сторону, уточненная методика также применима при $\Delta P_{\text{вп2}} = 0$. Подтверждением ее правильности служат результаты исследований перекоса по теплу между левой и правой панелью СО котла ТГ-104, которые показали, что наличие ЛСВ не устраняет солевой перекоп между СО.

Для выбора оптимального места вывода непрерывной продувки рассмотрим приведенную на рисунке 12 модель внутрикотловой схемы котла в виде ВЦ с одноступенчатым испарением и разными местами вывода продувки.

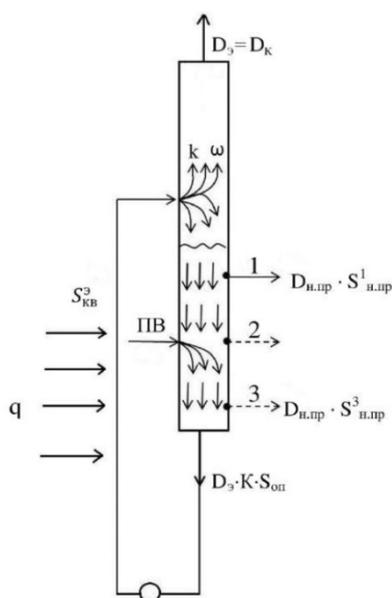


Рисунок 12 – Модель котла с вариантами места вывода непрерывной продувки

Из солевых балансов можно получить:

– при продувке из точки 1 отношение соледержаний равно

$$\frac{S_{кв1}^э}{S_{пв}} = \frac{100 + p}{p} \quad (17)$$

причем $S_{кв1}^э = S_{н.пр}^1$;

– при выводе из точки 3 с учетом (6) отношение равно

$$\frac{S_{кв3}^э}{S_{пв}} = \frac{100 + p}{p} \cdot \frac{K}{K - 1} \quad (18)$$

причем $S_{н.пр}^3 = S_{оп}^3 = S_{н.пр}^1$.

При продувке из точки 3 концентрация солей на которой работает циркуляционный контур и СУ ($S_{кв3}^э$), например, при $K = 4 \div 2$ будет в $1,33 \div 2,0$ раза выше, следовательно и темп отложения накипей будет выше, а соледержание пара будет больше, чем при работе с продувкой из точки 1. При продувке из точки 2, подвод ПВ и вывод продувки в одной горизонтальной плоскости, получим промежуточный результат между выводами продувки из точки 1 и точки 3. По этой схеме работают практически все котлы ТЭС с одноступенчатым испарением КВ, в том числе и КУ.

Аналогичный анализ и расчеты с учетом избирательного выноса SiO_2 , показали, что для котлов с $P = 15,2$ МПа при $k = 3,5$ % и $p = 1$ % место вывода продувки почти не влияет на концентрацию SiO_2 в циркуляционном контуре, так как условная продувка за счет выноса SiO_2 с паром в 3,5 раза выше, чем за счет продувки с КВ.

При проектировании внутрикотловых устройств вывод продувки необходимо выполнять из точки 1, до смешения котловой воды с питательной, это

позволит, по сравнению с продувками из точки 2 и точки 3, работать циркуляционному контуру и сепарационным устройствам (СУ) на КВ на 25÷50 % (при $K = 4 \div 2$) более низком солесодержанием, уменьшить темп отложений накипеобразователей в циркуляционных контурах, улучшить качество пара или снизить величину продувки. Эти результаты были использованы при оптимизации внутрикотловой схемы барабана ВД КУ ПК-85 ПГУ.

В главе 3 приведены результаты исследований и разработки эффективных сепарационных устройств. Исследования сепарационных устройств (СУ) с баработажно-промывочным устройством (БПУ) (см. рисунок 1) были выполнены на котле ТПЕ-208. На основании обработки результатов исследований, приведенных на рисунке 13 было установлено, что коэффициент избирательного выноса

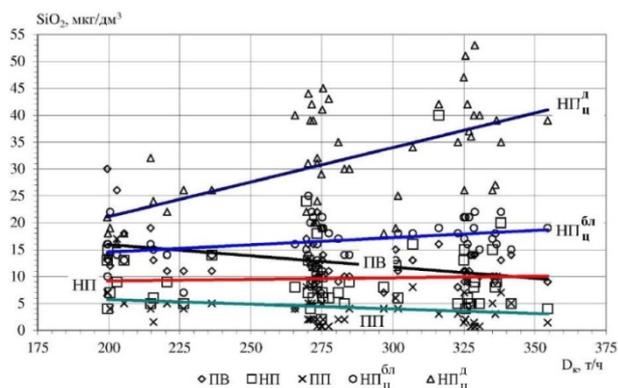


Рисунок 13 – Концентрация кремнекислоты в паре котла в зависимости от его паровой нагрузки $P_6 = 13,5 \div 14,8$ МПа

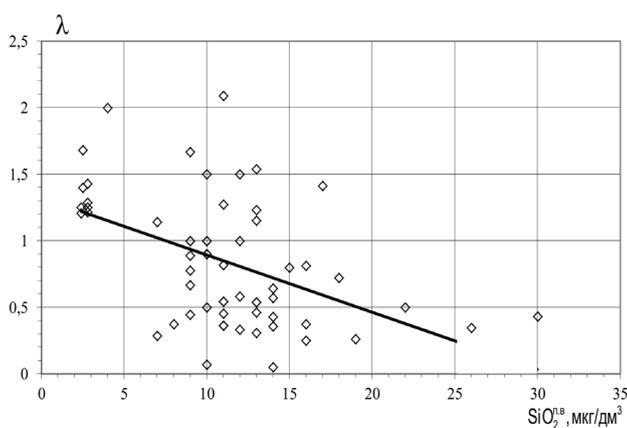


Рисунок 14 – Зависимость коэффициента эффективности паропромывочного устройства от кремнесодержания питательной воды

SiO_2 из солевого отсека (СО) в зависимости от рН КВ составил от 1,2 до 2,2 %.

Работу БПУ характеризует коэффициент эффективности промывки равный

$$\lambda = \frac{\text{SiO}_2^{\text{нп}}}{\text{SiO}_2^{\text{пб}}} \quad (19)$$

Зависимость его от кремнесодержания в питательной воде показана на рисунке 14. При $\text{SiO}_2^{\text{пб}} = 30$ мг/дм³, $\lambda = 0,3 \div 0,4$ (концентрация $\text{SiO}_2^{\text{нп}}$ в паре составляет 30÷40 % от концентрации в ПВ), а при $\text{SiO}_2^{\text{пб}} = 7 \div 10$ мг/дм³, $\lambda \approx 1,0$ и промывка практически перестает «работать».

Эффективность БПУ снижается из-за недостаточной скорости массообмена при низком концентрационном напоре

между непромытым паром и ПВ, являющемся движущей силой массообмена, что следует из закона Фика:

$$q = K\Delta C, \quad (20)$$

где q – суммарный перенос вещества, K – коэффициент массопереноса, ΔC – разность концентраций между паром и паром на границе раздела фаз.

Результаты исследований и расчетов солевых балансов для котлов с $P_6 = 15,2$ МПа и двухступенчатой схемой испарения показали, что БПУ на них можно не устанавливать в следующих случаях:

- для котлов ГРЭС при $SiO_2^{mb} \leq 30$ мкг/дм³ (норма ПТЭ) и продувке $p \geq 0,5$ % обеспечивается отпущ пар с $SiO_2 \leq 15$ мкг/дм³ (норма ПТЭ);
- для котлов ТЭЦ с производственными отборами при $SiO_2^{mb} \leq 50$ мкг/дм³ и $p \geq 0,5$ % обеспечивается отпущ пар с $SiO_2 \leq 25$ мкг/дм³ (норма ПТЭ).

Отказ от применения БПУ в сепарационных схемах улучшает гидравлику в барабане и циркуляционных контурах и повышает надежность котлов. При проектировании новых котлов без БПУ можно приблизительно в 1,5 раза уве-

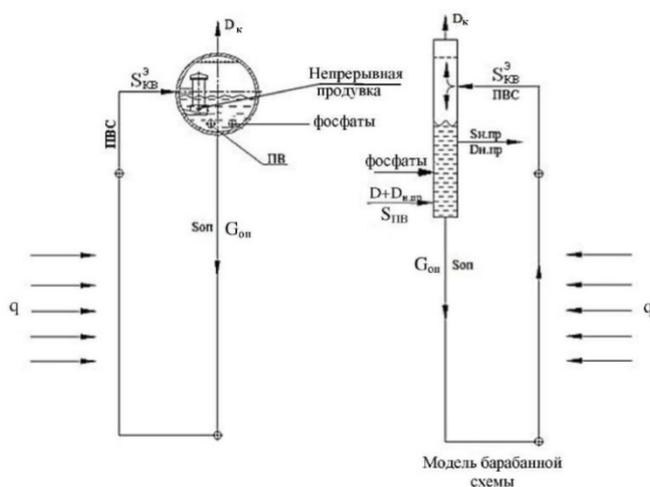


Рисунок 15 – Оптимальная внутрикотловая схема барабанных котлов и котлов-утилизаторов

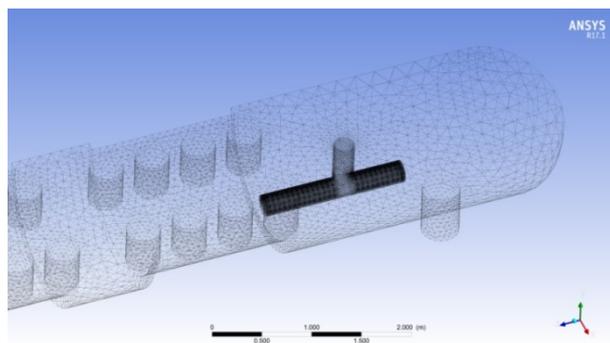
личивать удельные паровые нагрузки на метр длины барабана, уменьшить их длину и массу приблизительно на 40 %.

В главе 2 было показано, что вывод продувки целесообразен из зоны наибольшей концентрации солей до смешения упаренной КВ с ПВ. Это особенно актуально для КУ работающих, с небольшими

кратностями циркуляции $K < 5,0$. На рисунке 15 слева показана упрощенная внутрикотловая схема, а справа модель этой схемы. Оптимальная внутрикотловая схема КУ ПК-85 была разработана с учетом результатов исследований гидравлики и солевого режима. Продувка предусмотрена из зоны до смешения КВ

с ПВ, подвод которой выполняется в торцевые части барабана. Отвод КВ в опускные трубы осуществляется так же в торцевых частях барабана после смешения упаренной КВ с ПВ.

Было проведено математическое моделирование физических процессов в водяном объеме барабана с использованием программного комплекса Ansys Fluent при следующих исходных данных: $D_K^H = 297$ т/ч, $P_6 = 15,2$ МПа,



$t_s = 343$ °С, $t''_{ПВ} = 323$ °С, $K = 3,57$,
 $d_6^{BH} = 1800$ мм, $d_{оп}^{BH} = 389$ мм, $Re_6 = 1,2 \cdot 10^6$.

Рисунок 16 – Расчетная 3D-модель барабана с внутрибарабанными циклонами, коллектором подвода питательной воды и опускным стояком

На рисунке 16 приведена расчетная модель барабана с циклонами, коллекторами подвода ПВ и опускными стояками. Объемная модель барабана разбивалась на тетраэдры, образуя сетку с числом сетчатых элементов 1130131.

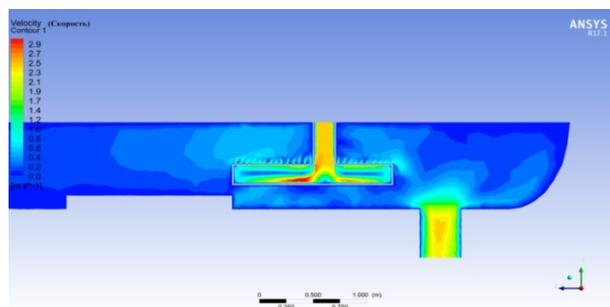


Рисунок 17 – Распределение скоростей воды в объеме барабана

Система уравнений, описывающих движение жидкости, теплопередачу и диффузию примесей в турбулентном потоке решалась методом конечных объемов. Было получено распределение скоростей в объеме барабана (рисунок 17), распределение концентрации солей (рисунок 18) и распределение температур.

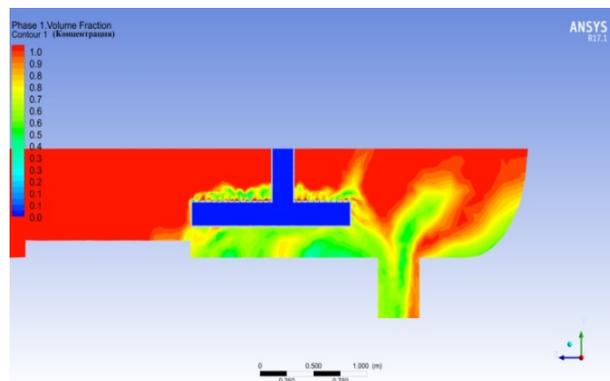


Рисунок 18 – Распределение концентрации солей в водяном объеме барабана

Моделирование показало, что запроектированный коллектор с системой выпускных отверстий по верхней образующей позволяет равномерно распределять ПВ по объему барабана. В результате температура стенки барабана, кромки опускного стояка и самого стоя-

ка, близки к температуре насыщения. Упаренная КВ до питательного коллектора, не смешивается с ПВ и продувка «работает» на этой КВ. Выравнивания концентрации солей за счет турбулентной диффузии «вверх» по течению не происходит. Этот результат хорошо коррелируется с опытами на котлах ТП-170, ТП-80 и ТГ-104.

Точность расчетов, выполненных программным комплексом Ansys приведена в таблице 2.

Расхождение этих параметров не превышает 2,45 %, что вполне допустимо.

Таблица 2 – Сравнение основных параметров в опускном стояке, рассчитанных по Ansys и по закону сохранения массы и смешения

Параметр	По Ansys	По закону сохранения массы	Относительная погрешность, %
Средняя скорость, м/с	2,04	1,99	2,45
Средняя температура, °С	336	337	0,3
Средняя концентрация	0,735	0,718	2,3

На основании этих исследований и расчетов была разработана внутрикотловая схема котла ПК-85 без БПУ, показанная на рисунке 19. Результаты испытания приведены в таблице 3. Высокое качество пара, даже при повышении

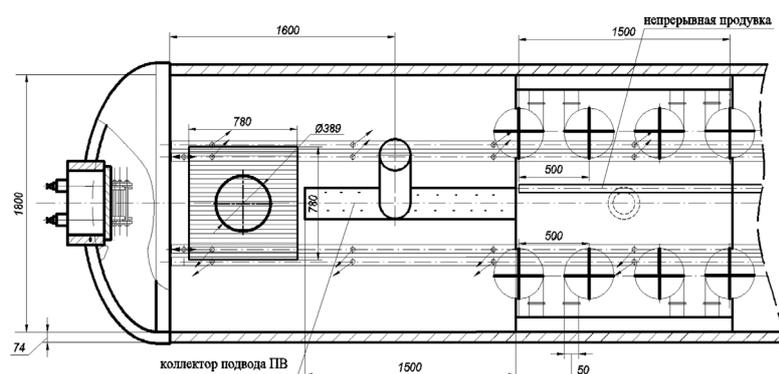


Рисунок 19 – Внутрибарабанные устройства котла ПК-85 (продольный разрез)

против норм концентрации солей в ПВ и КВ и продувке $p = 0,5 \div 1,0$ % были достигнуты за счет размещения продувки в зоне наибольших концентраций солей в КВ, оптимизации циклонов и увеличения их паровой высоты

приблизительно на 100 мм. Высота парового сепарационного объема барабана увеличена с 400 мм, как у котлов с БПУ до 670 мм, что улучшает «работу» гравитационной сепарации.

Таблица 3 – Качество воды и пара барабана высокого давления КУ ПК-85 (по данным испытаний «Урал ОРГРЭС»)

Показатель	Питательная вода		Пар	Котловая вода	
	норма	достигнутые результаты		норма	норма
рН	9,0-9,2	–	> 8,5	9,3-9,6	–
УЭПн, мкСм/см	< 1,5	–	< 1	–	–
УЭП, мкСм/см	–	–	–	10-30	380
SiO ₂ – содержание кремнекислоты, мкг/дм ³	< 30,0	–	< 25,0	< 200,0	400
Na – содержание натрия, мкг/дм ³	< 50,0	200	< 5,0	–	–
PO ₄ – содержание фосфатов, мг/дм ³	–	–	–	0,5-2	–

Солесодержание КВ существенно влияет на качество пара. Котел БКЗ-75-39 на одной из ТЭЦ, выполненный по двухступенчатой схеме испарения КВ работал с солесодержанием питательной воды ($S_{пв}$) до 500 мг/дм³. При этом он мог отпускать пар согласно норм $Na \leq 100$ мкг/дм³, при продувке $p > 10 \div 15$ %. Для возможности экономичной работы котла при таких тяжелых водных условиях была выполнена реконструкция внутрикотловой схемы путем ее перевода с двух на трехступенчатую, переноса отвода пара после ВЦ из центральной части барабана, где размещался ЧО, во вторую ступень испарения с установкой коробов, направляющих поток в торец барабана, как показано на рисунке 20. На рисунке 21 приведены результаты исследований, из которых видно, что во всем диапазоне нагрузок при $S_{пв} \leq 500$ мг/дм³, $S_{кв III} \leq 10000$ мг/дм³ и $p \approx 5$ % концентрация Na в паре не превышала норму, составляющую 100 мкг/дм³.

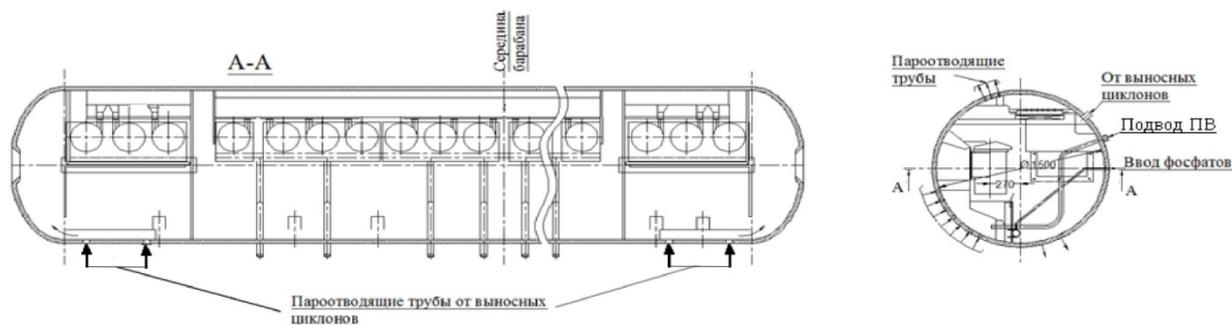
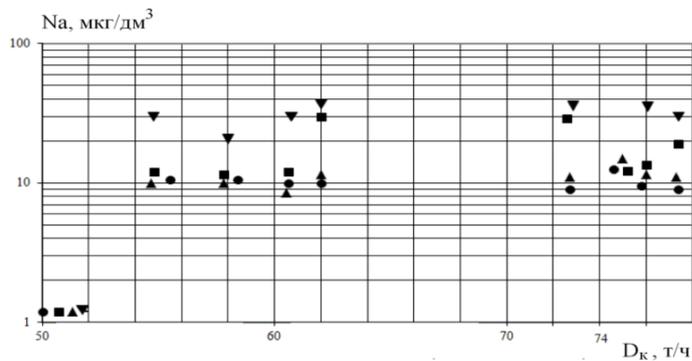


Рисунок 20 – Реконструированная сепарационная схема котла



● – НП_л; ■ – НП_{ср}; ▲ – НП_{пр}; ▼ – ПП;
 $P_6 = 3,63 \div 3,82$ МПа; $t_{\text{пит}} = 420 \div 440$ °С; $H_6 = \pm 20$ мм;
 $P \approx 5$ %

Рисунок 21 – Сепарационная характеристика котла после реконструкции

пытания циркуляции. Питательные трубы СО этого котла имеют пониженную площадь сечения и, соответственно, повышенную скорость $W_{\text{пит}}$. Отношение площади сечения питательной трубы к площади экрана составляет $f_{\text{пит}}/f_3 = 0,155$, а $w_{\text{пит}} = 1,5$ м/с. У типовых котлов скорости в трубах питания и отношение сечений равны $W_{\text{пит}} = 0,38 \div 0,76$ м/с, $f_{\text{пит}}/f_3 = 0,2 \div 0,41$, а нормами рекомендуется скорость не более 0,6 м/с.

Уровни воды в ближнем и дальнем циклонах рассчитывались по зависимостям:

$$\Delta H_{\text{ц}}^{\text{бл}} = \frac{\Delta P_{\text{вп1}} + \Delta P_{\text{дп1}} + \Delta P_{\text{мп1}}}{\rho' - \rho''} \quad (21)$$

$$\Delta H_{\text{ц}}^{\text{д}} = \frac{\Delta P_{\text{вп1}} + \Delta P_{\text{вп2}} + \Delta P_{\text{дп2}} + \Delta P_{\text{мп2}}}{\rho' - \rho''}, \quad (22)$$

где $\Delta P_{\text{вп1}}$, $\Delta P_{\text{вп2}}$, $\Delta P_{\text{дп1}}$, $\Delta P_{\text{дп2}}$, $\Delta P_{\text{мп1}}$, $\Delta P_{\text{мп2}}$ – сопротивления, соответственно труб питания ближнего и дальнего циклонов, дырчатых листов и труб отвода пара.

До испытаний был выполнен внутренний осмотр ВЦ, который показал, что у ближнего циклона отверстия дырчатых листов зашламлены на 10÷15 %, а у дальнего на 30 %.

Результаты исследований (см. рисунок 2) при номинальной нагрузке котла $D_{\text{к}}^{\text{н}}$ показали, что уровни воды при работе на газе (угле) в ближнем циклоне находились на отметке – 800 мм вод. ст. (–960 мм), а в дальнем – 960 мм вод. ст. (–1100 мм). По расчетам дополнительное снижение уровней за счет зашламле-

Глава 4 посвящена исследованию надежности испарительных поверхностей нагрева топочных экранов. На одном из котлов ТПЕ-208 происходили повреждения экранных труб выносного СО, конструкция которого приведена на рисунке 1. Там же показана и расстановка устройств для исследования

ния отверстий составляло в ближнем 250, а в дальнем — 500 мм, следовательно, при работе котла с частично зашламленными отверстиями уровни составляли в ближнем циклоне – 1130 (–1210), а в дальнем – 1460 мм (–1600 мм). Штуцер продувки дальнего циклона находился на 1422 мм ниже среднего уровня в барабане (см. рисунок 1). Вследствие этого при работе котла с частично зашламленными отверстиями ВЦ при D_k^H уровень воды в дальнем циклоне опускался ниже отметки вывода продувки и она выключалась из работы. Через продувку, как неоднократно наблюдалось при эксплуатации, начинал поступать пар, а показания расходомера продувки снижались до нуля. Затем из-за нарушения материального баланса дальнего циклона, поступление воды в него больше $D_{ц}^D$ и расхода продувки, уровень в дальнем циклоне поднимался до отметки продувки, она снова включалась в работу и далее весь цикл колебаний уровня повторялся. Периодическое выключение продувки приводило к накоплению солей (щелочей) в СО, увеличению рН КВ выше регламентированного ПТЭ значения 10,5 и щелочной коррозии экранных труб, а также более интенсивному накипеобразованию. Очистка отверстий листов в циклонах позволила нормализовать гидравлику и водный режим СО и повысить надежность.

На ГРЭС с котлами ТПЕ-208, на одном из блоков, после наработки 98 тыс. часов начались повреждения экранных труб СО, конструкция которого показана на рисунке 1. Все повреждения были сосредоточены в трубах дальней половины второй панели правого бокового экрана (трубы №№ 17÷32), которая условно замкнута на дальний циклон, на отметке 14÷15 м в районе разводки труб под амбразуры верхних растопочных горелок. На рисунке 22 показан характер повреждения труб, представлявших собой продольные трещины и сквозные отверстия, на внутренней поверхности с огневой стороны имеются язвины и раковины, группы которых, образовывали поля повреждений длиной до 500 мм. Металлографические исследования показали, что перегрева металла труб в зоне повреждений нет, а причиной их повреждений является интенсивная подшламовая коррозия, начинающаяся развиваться по язвенному типу. При обследовании было установлено, что водный режим соответствовал нормам

ПТЭ, концентрация фосфатов в ЧО $0,56 \div 1,15$ мг/дм³, а в СО $4,95 \div 8,18$ мг/дм³, среднегодовое значение продувки $p = 0,48 \div 0,73$ %. Линии непрерывной продувки котлов по проекту были выведены из водяных объемов ближних циклонов, рисунок 1, точка б, а отборы проб КВ из опускной трубы № 4 ближнего ВЦ. В соответствии с такой схемой включения продувки и отбора проб водный режим СО велся по циркуляционному контуру ближнего циклона, а водный режим дальнего циклона был неизвестен.



Рисунок 22 – Характер повреждений труб солевого отсека № 31 и № 32

рисунку 1, точка б, а отборы проб КВ из опускной трубы № 4 ближнего ВЦ. В соответствии с такой схемой включения продувки и отбора проб водный режим СО велся по циркуляционному контуру ближнего циклона, а водный режим дальнего циклона был неизвестен.

В главе 2 приведена модель распределения концентрации солей в одностороннем СО, имеющем два ВЦ замкнутых на одну экранную поверхность нагрева и было установлено, что концентрация солей в контуре дальнего циклона приблизительно в 3 раза выше, чем у ближнего. При выполнении продувки и отбора проб КВ из контура ближнего циклона (рисунок 1 точка б) значения контролируемых показателей КВ распространяются для контура ближнего циклона (трубы №№ 1÷16). В циркуляционном контуре дальнего циклона (трубы №№ 17÷32) концентрация PO_4 будет приблизительно в 3 раза выше, более интенсивное отложение фосфатных накипей и развитием коррозии под слоем отложений, что и привело к повреждению экранных труб СО только этого контура. Ночные разгрузки блока приводили к появлению хайд-аута фосфатов со значительным увеличением их концентрации, прежде всего, в дальнем циклоне, где толщина отложений выше, что способствовало увеличению скорости коррозии и вследствие этого утонению стенки экранных труб меньше допустимой по условиям прочности, что и приводило к повреждениям. Процесс хайд-аута фосфатов характеризуется увеличением их концентрации при снижении нагрузки котла за счет вымывания фосфатов из отложений или снижения их концентрации в КВ при увеличении нагрузки. Эти повреждения свидетельствуют о несовершенстве принятых методик расчета схем ступенчатого испа-

рения, в которых в пределах ступени испарения концентрации солей считаются одинаковыми, а также правильность разработанной модели распределения концентрации солей в СО с двумя циклонами замкнутых на одну экранную поверхность нагрева. После переноса линии продувки из точки *б* ближнего циклона в точку *а* дальнего повреждения прекратились.

Надежность топочных контуров с естественной циркуляцией зависит от многих режимных и конструктивных параметров, в том числе и от кратности циркуляции (*K*). Ее нормативное значение для котлов с $P_6 = 15,2$ МПа – не менее 4,0 ($x = 0,25$) нуждается в уточнении с учетом местного тепловосприятия поверхности нагрева ($q_{эфф}$), неравномерности распределения тепловосприятия между стенами топки ($\eta_{ст}$), по ширине и высоте ее стен ($\eta_{ш}$), ($\eta_{в}$), сложности циркуляционной схемы и наличия гидравлических связей между отдельными панелями экранов по опускным и отводящим системам, равномерного или одностороннего обогрева экранных труб, наличия или отсутствие БПУ, количества ПВ подаваемой на промывку, в чистом или СО работает панель, значения циркуляционных пульсаций и др.

При испытаниях котла БКЗ-420-140 на топочной гладкотрубной поверхности нагрева выполненной из труб $\varnothing 60 \times 6$ мм с шагом $S/d = 1,067$ наблюдалась значительная разница температур по окружности трубы (розетка температур). На рисунке 23 они показаны для первой панели заднего экрана (ЗЭ) (труба № 24) и третьей панели правого бокового экрана (БЭ) (труба № 96). Наружная

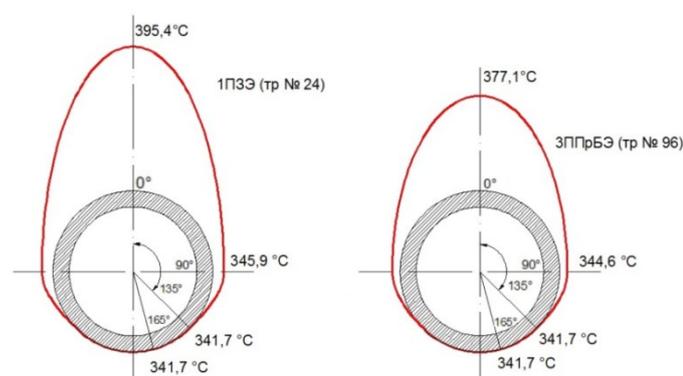


Рисунок 23 – Розетка наружных температур стенки труб котла БКЗ-420-140 при $D_K = 425,7$ т/ч, $P_6 = 14,92$ МПа, $t'_s = 341,7$ °С

температура огневой части стенки трубы № 24 составляет 395,4 °С ($t_M^л - t_s = 53,7$ °С), боковой стенки 345,9 °С ($t_M^б - t_s = 42$ °С), а тыльной $t_s = 341,7$ °С. Разница наружных температур стенки труб между лобовой и боковой частями для трубы № 24 составила $t_M^л = t_M^б = 49,5$ °С,

а для трубы № 96 $t_m^n - t_m^o = 32,6^\circ\text{C}$. Эти разницы обусловлены закономерностями радиационного теплообмена. Они приводят к неравномерности и $q_{\text{вн}}$, увеличению темпа отложений накипей в огневой части трубы по сравнению с тыльной. В итоге внутренняя загрязненность труб котлов с огневой стороны всегда выше, чем с тыльной.

На основании обобщения экспериментальных данных для настенных испарительных экранных поверхностей нагрева с односторонним обогревом для котлов с $P_6 = 15,2$ МПа при $\rho_w = 700 \div 1500$ кгс/м²с ($W_0 = 1,17 \div 2,51$ м/с) для труб с внутренним диаметром до 48 мм ($\text{Ø } 60 \times 6$) ОАО «ВТИ¹», рекомендует принимать $X_{\text{тр}}^o = 0,2$, что соответствует кратности циркуляции $K = 5,0$.

Увеличение минимального значения K более 4,0 целесообразно, так как экранные трубы с внутренней стороны всегда покрыты слоем отложений, причем в СО они как правило в 1,5 и более раза выше, чем в ЧО. Поэтому на стенке трубы может возникнуть так называемое «фитильное кипение», при котором может существовать режим DNB (Deviation from Nucleating Boiling), называемый «отклонение от пузырькового кипения». Вследствие такого режима кипения концентрация солей в пристенной области, в том числе и слое отложений, может в 10÷40 раз превышать их концентрацию в объеме КВ, так называемой «пристеночный хайд-аут».

В работе ОАО «ВТИ²» для циркуляционных контуров котлов высокого и сверхвысокого давления рекомендовано принимать $K = 4,0 \div 5,0$.

Наличие постоянных циркуляционных пульсаций расходов, скоростей приводят к колебанию K . Если рассчитать K по расходу воды в опускных трубах (см. рисунок 3), то получим следующие значения $K_{\text{ср}} = 7,7$, $K_{\text{max}} = 8,7$, а $K_{\text{min}} = 6,4$, как видно снижение K в контуре ниже средней величины может составлять 1,3. В таблице 4 приведены расчеты циркуляции в контурах котла ТПЕ-208. При этом в контурах с $K < 5,0$ вероятность повреждения поверхностей нагрева составляет 18 %, а в контурах с $K > 5,0$ только 1,9 %.

¹ Шварц А.Л. Использование результатов исследований В.Е. Дорощука для обеспечения надежности котлоагрегатов энергоблоков / А.Л. Шварц // Дорошук Василий Ефимович: воспоминания, документы и факты / под общ. ред. член-кор. РАН Г.Г. Ольховского. – М.: ОАО «ВТИ», 2015. – С. 15–20.

² Локшин В.А. Исследования гидравлических процессов и температурного режима котельных поверхностей нагрева: автореф. дис. доктора техн. наук / Вениамин Аронович Локшин, МЭИ. – Москва, 1965. – 52 с.

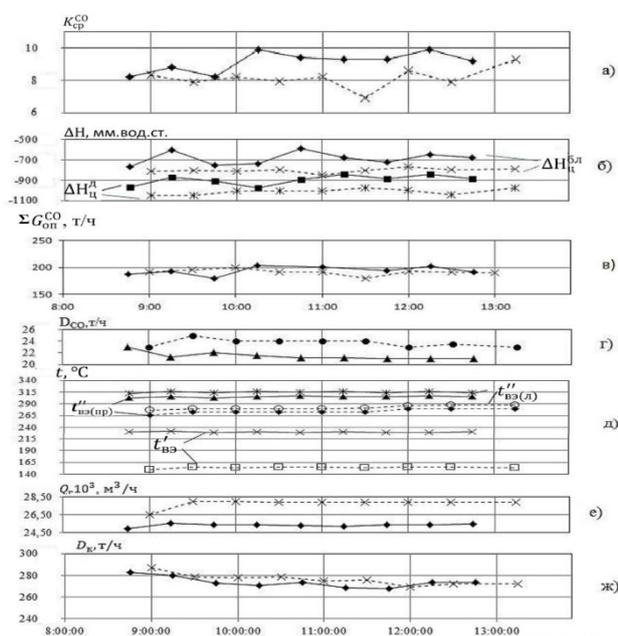
Таблица 4 – Расчетные значения средних кратностей циркуляции (паросодержаний) в экран-ных поверхностях нагрева

№ п/п	Панель экрана	Топливо					
		газ			интинский уголь		
		количество воды, подаваемое на промывку					
		без БПУ (0 %)	50 %	100 %	без БПУ (0 %)	50 %	100 %
Задний экран							
1	1-я (6-я)	7,37 (0,136)	6,63 (0,151)	5,98 (0,167)	8,74 (0,114)	6,36 (0,157)	5,68 (0,176)
2	2-я (5-я)	6,08 (0,164)	5,4 (0,185)	4,95 (0,202)	6,74 (0,148)	5,16 (0,194)	4,69 (0,213)
3	3-я (4-я)	4,91 (0,204)	4,45 (0,225)	4,1 (0,244)	5,15 (0,194)	4,24 (0,236)	3,9 (0,256)
Боковые экраны							
4	2-я-ЛБЭ	–	6,82 (0,147)	6,0 (0,167)	–	6,19 (0,162)	5,68 (0,176)
5	2-я-ПрБЭ (СО)	6,85 (0,146)			6,54 (0,153)		

Для обеспечения надежности температурного режима топочных испарительных поверхностей нагрева с односторонним обогревом котлов с $P_6 = 15,2$ МПа с учетом неравномерности эпюры паросодержаний по поперечному сечению экранных труб, наличия отложений на их внутренней поверхности, пульсирующего характера циркуляции и неизбежных отклонений режимов эксплуатации, при расчетах и проектировании циркуляционных контуров целесообразно принимать для выносных СО $K_{cp} \geq 5,0$, а для ЧО $K_{cp} \geq 4,5$.

В главе 5 исследовано влияние режимов и условий эксплуатации на работу котлов. Температура ПВ влияет на работу котлов, в особенности при наличии в сепарационной схеме БПУ. Вследствии конденсации части пара на листах промывки $\Sigma D_3 > D_k$, а в схемах без БПУ $\Sigma D_3 = D_k$. Кратности циркуляции рассчитываются: для котлов с БПУ – $K_{cp}^{БПУ} = \Sigma G_{оп} / \Sigma D_3$, а без БПУ – $K_{cp}^{без БПУ} = \Sigma G_{оп} / \Sigma D_k$ и при одинаковых значениях $t_{пв}$, D_k и $\Sigma G_{оп}$ $K_{cp}^{без БПУ} > K_{cp}^{БПУ}$. По результатам испытаний котла ТПЕ-208 получены следующие величины $\Sigma D_3 = D_k + G_k$, рассчитанные по формуле (4) при разной подаче ПВ на БПУ. При $\Sigma D_k = 200$ т/ч – $D_3 = 212$ т/ч ($1,06D_k$) 50 % подаче ПВ, $D_k = 200$ т/ч – $\Sigma D_3 = 225$ т/ч ($1,125D_k$) 100 % ПВ, при $D_k = 340$ т/ч – $\Sigma D_3 = 370$ т/ч ($1,09D_k$) 50 % ПВ, $D_k = 340$ т/ч – $\Sigma D_3 \approx 400$ т/ч ($1,18D_k$) 100 % ПВ.

На рисунке 24 приведены результаты исследований работы котла с подогревателем высокого давления (ПВД) и без него, при $D_k = 280$ т/ч (83,6 % D_k^H) и расходе газа $25,5 \cdot 10^3$ м³/час с ПВД, а без ПВД – $28 \cdot 10^3$ м³/час. Теплопроизводительность котла при работе с ПВД составляла 222 МВт, $t_{ПВ} = 230$ °С, $t''_{ВЭ} \approx 315$ °С, $\Delta t_{ВЭ} = 85$ °С, а без ПВД – $Q = 248$ МВт, $t_{ПВ} = 155$ °С, $t''_{ВЭ} = 280$ °С, $\Delta t_{ВЭ} = 125$ °С. Для выработки одинакового количества пара при работе без ПВД затрачивается большее количество топлива, чем котлом с ПВД. При этом в барабан подается на 35 °С более холодная вода. Уровни воды в циклонах снижаются приблизительно на 100÷150 мм.



a – кратность циркуляции; *б* – уровень воды в выносных циклонах; *в* – расход воды в опускных трубах солевого отсека; *г* – паропроизводительность солевого отсека; *д* – температура воды на входе и выходе в ВЭ; *е* – расход газа на котел; *ж* – паропроизводительность котла
 ————— с ПВД; - - - - - без ПВД

Рисунок 24 – Режимные опыты работы котла с подогревателем высокого давления и без него

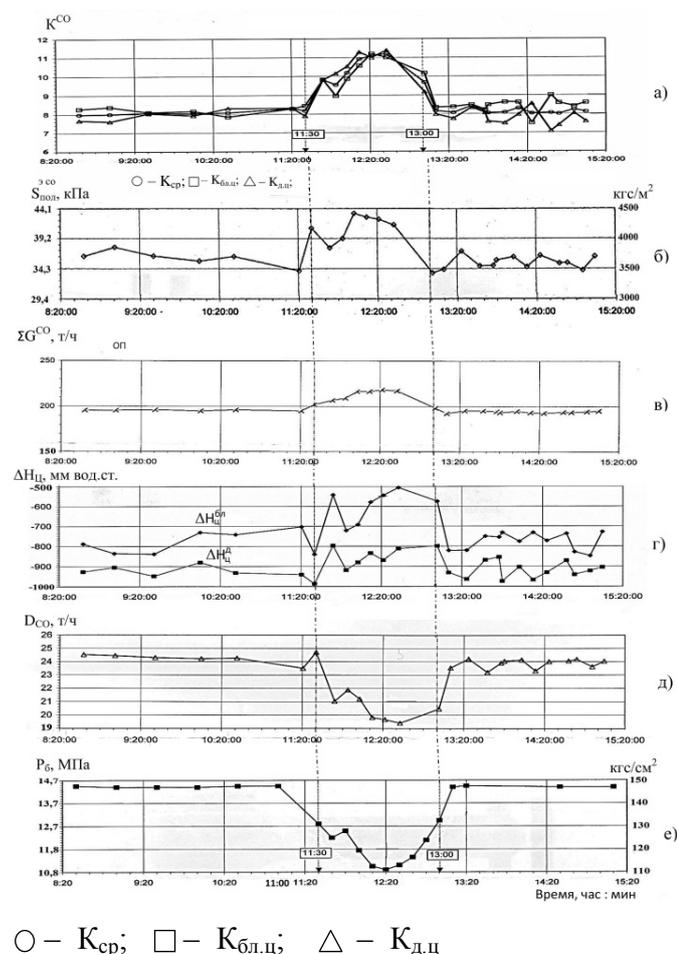
работе без БПУ – $K = 4,9$. Отказ от применения БПУ позволяет увеличить кратность циркуляции K на $0,5 \div 0,8$. Наименьшая $K = 3,9$ наблюдается в самых напряженных по теплу третьей и четвертой панелях ЗЭ, при сжигании угля и 100 % подаче ПВ, она ниже рекомендаций действующих норм $K \geq 4,0$ ($x \leq 0,25$).

Уровни воды в циклонах снижаются приблизительно на 100÷150 мм. $\Sigma G_{оп} CO$ с ПВД, так и без него составляет 200 т/час, рисунок 24, *в*. Вследствие большей выработки пара экранной поверхностью СО при работе без ПВД кратность циркуляции снижается примерно на 1,5 (рисунок 24, *а*).

Были выполнены расчеты циркуляции в контурах котла при $D_k^H = 335$ т/ч, 50 % и 100 % подаче ПВ на БПУ, а также без БПУ, результаты которых приведены в таблице 4. Увеличение подачи ПВ на промывку приводит к снижению K за счет увеличения G_k на БПУ и роста $\Sigma D_э$. При работе на газе для третьей панели заднего экрана (ЗЭ) 100 % подаче ПВ $K = 4,1$, при 50 % – $K = 4,45$, а при

В главе 4 было показано, что надежность температурного режима топочных испарительных поверхностей нагрева котлов с $P_6 = 15,2$ МПа обеспечивается при $K_{ср} \geq 4,5 \div 5,0$. Из данных таблицы 4 видно, что во всех циркуляционных контурах котла, кроме 3П и 4ПЗЭ, обеспечивается это условие. Подтверждением этого служит также количество повреждений в ЧО: в 3П и 4ПЗЭ отношение количества поврежденных труб к их общему числу – вероятность повреждения, равна $13/72 \cdot 100 \% = 18 \%$, то суммарно во всех остальных поверхностях она равна $7/364 \cdot 100 \% = 1,9 \%$, что на порядок ниже.

Кроме расчетов циркуляции на части контуров было выполнено, также экспериментальное определение ее параметров. По расчету 2ПЛБЭ (ЧО) при работе котла на газе и номинальной нагрузке имеет расход воды в опускных трубах $\Sigma G_{оп} = 169,2$ т/ч, а по экспериментальным данным – 177 т/ч, по расчету во 2ППрБЭ $\Sigma G_{оп} = 190$ т/ч, а по экспериментальным данным – 194 т/ч (см. рисунок 2).



○ – $K_{ср}$; □ – $K_{бл.ц}$; △ – $K_{д.ц}$
 Рисунок 25 – Влияние снижения давления в котле на работу выносного солевого отсека

Расхождения расчетных от экспериментальных значений составляет $2 \div 5 \%$ и свидетельствует о достоверности выполненных расчетов.

При работе котлов без ПВД для обеспечения надежности необходимо ограничить максимальную паровую нагрузку котла до $\leq 80 \% D_K^H$.

В котельной практике иногда возникают режимы работы котлов на сниженном, по сравнению с номинальным, давлением пара. На рисунке 25 приведен опыт снижения давления в барабане котла ТПЕ-208 с 14,5 МПа до 10,8 МПа (на

3,7 МПа) при $t_{\text{шт}} \approx 550$ °С, приблизительно постоянной теплопроизводительности котла. При этом расход пара снижается с $D_k = 333,5$ т/ч до 320 т/ч, а в солевом отсеке $D_{\text{со}}$ с 24 до 19,5 т/ч, в основном за счет увеличения скрытой теплоты парообразования с 1031,6 кДж/кг до 1267,3 кДж/кг. В результате снижения $D_{\text{со}}$ уменьшается подача в СО КВ_I и снижаются $\Delta P_{\text{вп}}$ и $\Delta P_{\text{шт}}$, а уровни воды в циклонах поднимаются в ближнем циклоне с -750 до -550 мм, а дальнем с -930 до -880 мм (рисунок 25, з). $S_{\text{пол}}^{\text{э}} = S_{\text{дв}} - \Delta P_{\text{эл}}$ увеличивается с 36,3 кПа до 42,1 кПа (рисунок 25, б) в основном за счет увеличения $S_{\text{дв}} = H_{\text{пар}} \cdot \phi \cdot (\rho' - \rho'')$, из-за увеличения $(\rho' - \rho'')$ при $P = 10,8$ МПа по сравнению с $P = 14,5$ МПа приблизительно в 1,18 раза. $\Sigma G_{\text{оп}} \text{ СО}$, увеличивается со 195 до 220 т/ч (рисунок 25, в), прежде всего, из-за увеличения $S_{\text{пол}}^{\text{к}} = S_{\text{пол}}^{\text{э}} + S_{\text{пол}}^{\text{отв}}$, где $S_{\text{пол}}^{\text{к}}$, $S_{\text{пол}}^{\text{э}}$, $S_{\text{пол}}^{\text{отв}}$ – полезные напоры контура, экрана и отводящей системы. В итоге K увеличивается с 8 до 11, следовательно со снижением давления с 14,5 МПа до 10,8 МПа надежность циркуляции в СО повышается (рисунок 25, а).

При эксплуатации встречаются случаи неравномерного обогрева поверхностей нагрева, например, при различии расходов топлива через горелки, при шлаковании экранов пылеугольных котлов и др. В главе 2 была получена зависимость (6) $S_{\text{кв}}^{\text{э}}/S_{\text{оп}} = K/(K-1)$ из которой следует, что увеличение K при снижении тепловосприятости и $D_{\text{э}}$, приводят к уменьшению $K/(K-1)$ и отношения $S_{\text{кв}}^{\text{э}}/S_{\text{оп}}$ и наоборот.

Было проверено влияние перекоса по расходу газа по горелкам в котле ТГ-104 с ЛСВ $\text{Ø}76 \times 6$ мм при следующих условиях: $D_k = 683,8$ т/ч; $P_6 = 14,75$ МПа; $t_{\text{оп}} = 544,2$ °С; $D_{\text{н.пр}}^{\text{лсв}} = 4,4$ т/ч; $D_{\text{н.пр}}^{\text{пр}} = 5,6$ т/ч; $p_{\text{н.пр}} \approx 1,46$ %, $Q \approx \text{const}$, два отбора проб КВ с перекосом по горелкам и три отбора без перекоса. Давление газа на три горелки верхнего яруса № 6, № 5 и № 4 левой части топki было снижено с $21,57 \div 24,8$ кПа до $17,46 \div 17,65$ кПа (рисунок 26). При этом в левой части топki во 2ПЗЭ и 2ПЛБЭ, включенной в левый СО, тепловосприятость и $D_{\text{э}}$ снижаются. Это ведет к снижению концентрации солей в этих

панелях. В правой же части топки, за счет большей подачи топлива в правые горелки, тепловосприятости 8ПЗЭ и 2ППрБЭ и DЭ этой части топки растут, что ведет к увеличению концентрации солей в этих панелях. На рисунке 27



Рисунок 26 – Расположение горелок на фронтальной стене котла

натрия в $KB_{н.пр}$ в левом СО составляла 26500 мкг/дм^3 , а в правом 19000 мкг/дм^3 , а при работе с перекосом Na в $KB_{н.пр}^н$ уменьшился до 17500 мкг/дм^3 , а в $KB_{н.пр}^{пр}$ увеличился до 23000 мкг/дм^3 . Из данных испытаний следует, что концентрация солей в линии продувки этого котла приблизительно на 30 % выше

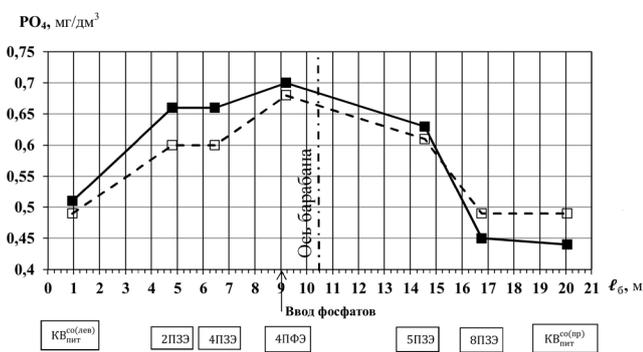


Рисунок 27 – Распределение концентрации фосфатов по длине барабана с перекосом и без перекоса по горелкам

так и без перекоса, причем различие в концентрации солей достигает до 39 %. В главе 2 было показано, что ЛСВ из-за условий естественной циркуляции в левых и правых СО не могут устранить солевые перекосы между СО при перекосах по теплу. Это подтверждается так же приведенными выше опытными данными. Работа котла с разными расходами газа на горелки и перекосом по тепловосприятию экранных поверхностей, приводит к интенсификации отло-

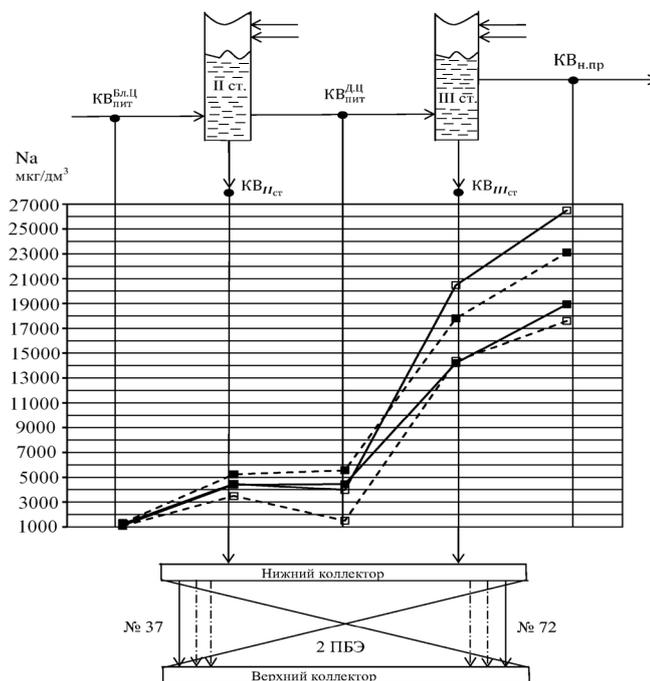
показано распределение концентрации фосфатов по длине барабана с перекосом и без перекоса по горелкам.

На рисунке 28 дано распределение концентрации натрия в СО. Из рисунка 28 видно, что при работе котла без перекоса концентрация

натрия в $KB_{н.пр}$ в левом СО составляла 26500 мкг/дм^3 , а в правом 19000 мкг/дм^3 , а при работе с перекосом Na в $KB_{н.пр}^н$ уменьшился до 17500 мкг/дм^3 , а в $KB_{н.пр}^{пр}$ увеличился до 23000 мкг/дм^3 . Из данных испытаний следует, что концентрация солей в линии продувки этого котла приблизительно на 30 % выше

концентрации в опускной трубе, поэтому для объективного контроля водного режима отбор пробы $KB_{СО}$ необходимо выполнять не из опускной трубы, как рекомендует РД 34.031.121-2007, а из линии продувки. ЛСВ не выравнивают концентрацию солей между левыми и правыми СО, как при перекосе по теплу СО,

жения накипей в трубах поверхностей нагрева с максимальными тепловосприимчивостями и D_9 и меньшими K , что может приводить к снижению надежности.



□ – левый СО; ■ – правый СО;
 — Без перекоса; - - - С перекосом

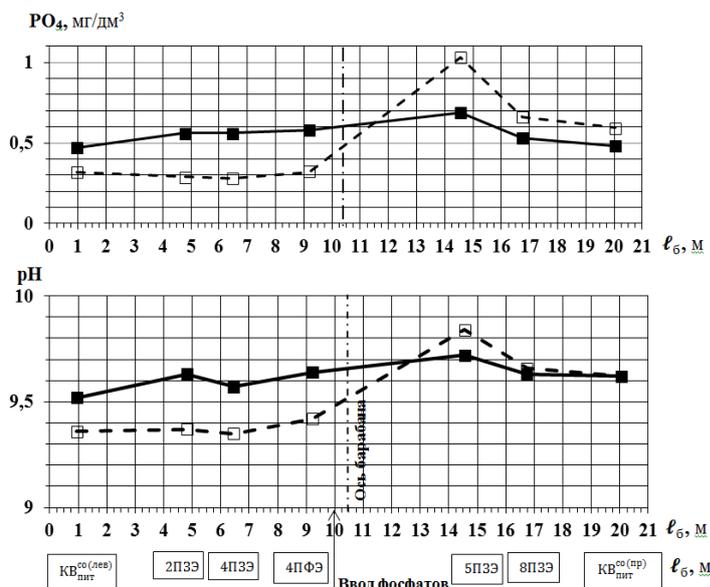
Рисунок 28 – Распределение концентрации натрия в солевом отсеке с перекосом и без перекоса по горелкам

От равномерности распределения фосфатов по длине барабана зависит надежность поверхностей нагрева. Из-за того, что расход фосфатов в котел относительно не велик, фосфатные коллекторы не всегда могут обеспечить их равномерное распределение. Для этого рекомендуется непосредственно перед вводом разбавлять фосфаты ПВ. Для проверки этой рекомендации на котле ТГ-104 было установлено 14 дополнительных отборов проб КВ. Результаты показанные на рисунке 29 были получены при следующих условиях: $D_K = 665$ т/ч ($99,3\% D_K^H$), $P_6 = 14,5$ МПа, $P_{оп}^{АиБ} = 12,6$ МПа, $t_{оп}^{АиБ} = 543,4$ °С, $t_{ПВ} = 262,7$ °С, $p \approx 1,2$ %.

Из него следует, что химический перекоп фосфатов по длине барабана без подачи ПВ составлял:

$$m = (PO_4^{\max} - PO_4^{\min}) / PO_4^{\max} \cdot 100\% = (1,03 - 0,317) / 1,03 \cdot 100\% = 69\%,$$

$$\text{а с подачей ПВ } m = (0,69 - 0,47) / 0,69 \cdot 100\% = 31,9\%.$$



—■— С подачей ПВ; ---□--- Без подачи ПВ

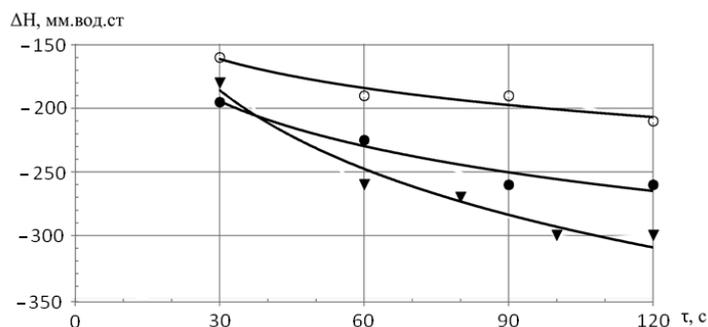
Рисунок 29 – Распределение концентрации солей по длине барабана котла ТГ-104 с подачей и без подачи ПВ в линию ввода фосфатов в барабан

Разбавление фосфатов ПВ приводит к снижению неравномерности их распределения по длине барабана более чем в два раза и повышению надежности испарительных труб ЧО.

Периодические продувки барабанных котлов для удаления осевших там продуктов коррозии и шлама осуществляются из нижних коллекторов циркуляционных контуров. Исследования, влияния периодических продувок были выполнены на котлах ТПЕ-208 и ТГ-104.

На котле ТПЕ-208 без ЛСВ был проведен опыт при $D_k = 310 \div 325$ т/ч; $P_6 = 14,21 \div 14,41$ МПа; $D_{co} = 23 \div 25$ т/ч, штуцер периодической продувки $d_{ВН}^{шт} = 20$ мм. После продувки в течение 30 с уровень в ближнем циклоне $H_{ц}^{бл}$ снижался с -800 до -980 мм (на 180 мм), при продувке 50 с – с 780 до -980 мм (на 200 мм), при продувке 60 с – с -740 до -1020 мм (на 260 мм). При проведении продувок продолжительностью от 30 до 120 с расход воды в опускных трубах увеличивается незначительно, при суммарном расходе равном 193,5 т/ч (см. рисунок 2), от 3,0 до 6,3 т/ч (1,6 ÷ 3,4 %). По расчету количество воды, удаляемое при продувке составляет порядка 14 % расхода воды в опускной системе. Влияние продувки на снижение скоростей циркуляции в экране незначительно.

При испытании на котле ТГ-104, оснащённом ЛСВ при нагрузке $D_k = 683$ т/ч ($102,0\% D_k^H$), $P_6 = 14,8$ МПа, $D_{co} \approx 68$ т/ч, $d_{ВН}^{шт} = 20$ мм снижение уровней в циклонах при проведении продувок представлено на рисунке 30. Как видно из рисунка снижение уровня достигает максимума при продувке в течение $1,5 \div 2$ мин и стабилизируется. Из рис. 30, обобщающем результаты продувок обоих котлов, следует, что в СО без ЛСВ (котел ТПЕ-208) при продувке уровни опускаются больше, чем в СО с ЛСВ (котел ТГ-104). В СО с двумя циклонами на сторону при продувке одной стороны СО, уровень в дальнем циклоне опускается меньше, чем в ближнем, так как ЛСВ СО включаются между дальними циклонами. Вследствие этого уровни воды в дальних циклонах при наличии ЛСВ опускаются одновременно в обоих СО, а уровни в ближних циклонах не связаны между собой. Уровень воды в ВЦ колеблется из-за циркуляционных пульсаций и слива на него закрученного потока воды (до 100 т/ч). На рисунке 3 показано положение уровней воды в ближнем и дальнем циклонах котла ТПЕ-208, их статистическая обработка (см. таблицу 1) показала, что пульсация уровней от среднего составляет от -199 до $+136$ мм.



ТПЕ-208 \blacktriangledown $H_{ц}^{бл.}$; ТГ-104 \circ $\Delta H_{ц}^{д.л.}$, \bullet $\Delta H_{ц}^{бл.л.}$

Рисунок 30 – Влияние времени открытия периодической продувки на величину снижения уровня воды в циклонах солевого отсека котлов ТПЕ-208 и ТГ-104

У котлов типа ТГМ-84Б, ТГМЕ-464, ТГМ-96 в СО, которых по одному циклону на сторону с ЛСВ, при отношении $f_{пит}/f_s \geq 35 \div 40\%$ периодические продувки через штуцер $d_{ВН}^{шт} = 20$ мм приводят к небольшому, как правило, не более 100 мм, снижению уровня воды в циклонах, не влияющему на надежность.

У котлов типа ТГ-104 с СО с двумя циклонами на сторону и ЛСВ, при отношении $f_{\text{пит}}/f_3 \geq 20 \%$, при продувке в течение 30 с уровни снижаются на 170÷190 мм, а при 120 с на 210÷270 мм.

У котлов с СО с двумя циклонами на сторону без ЛСВ и $f_{\text{пит}}/f_3 \geq 15 \%$ типа ТПЕ-208, при продувке в течение 30 с уровни воды снижаются на 200 мм, а при 120 с на 320 мм. Надежность СО при периодических продувках обеспечивается, если уровни воды в циклонах не снижаются более, чем на 600÷700 мм. При наличии в СО ЛСВ снижение уровней в циклонах меньше, чем при их отсутствии.

Заключение

1. Разработаны научно-технические основы обеспечения эффективности и надежности работы циркуляционных контуров, ступенчатого испарения, сепарационных устройств барабанов и выносных солевых отсеков котлов ТЭС с использованием новых методик, моделей и представлений, позволившие углубить понимание закономерностей гидравлических и физико-химических процессов, протекающих во внутрикотловых устройствах.

На этой основе разработаны рекомендации и технические решения по повышению надежности топочных испарительных поверхностей нагрева барабанных котлов, в том числе с выносными СО и двумя парами циклонов на сторону котла. Обоснована эффективная сепарационная схема без применения барботажно-промывочных устройств для барабанных котлов и котлов утилизаторов ПГУ. Уточнены целесообразность применения линий солевого выравнивания (ЛСВ) между солевыми отсеками и разработаны рекомендации по применению линий солевой кратности (ЛСК).

2. По результатам экспериментальных исследований и численного моделирования физических процессов в водяном объеме барабана впервые установлено, что решающее влияние на распределение концентрации солей в барабанах оказывают потоки из циркуляционных контуров при незначительном влиянии турбулентной диффузии, показано что при турбулентном режиме течения в исследуемых барабанах, при $Re_0 = 7,3 \div 13,0 \cdot 10^4$ и небольших продольных скоро-

стях воды равных $0,84 \div 1,7$ см/с, скорость турбулентной диффузии солей меньше этих скоростей, вследствие чего уменьшение (или увеличение) концентрации солей против продольного течения воды в барабане не происходит.

3. Впервые разработана и экспериментально проверена методика расчета схем ступенчатого испарения для двухсторонних солевых отсеков при перебросах из одного из них котловой воды в чистый отсек по пароперепускным окнам (трубам), ЛСК и опускным трубам, при солевых перекосах по длине барабана, позволившая выявить несоответствие в распределении концентрации солей в ступенях испарения с существующими методиками. Применение этой методики позволило углубить понимание гидравлических и теплохимических процессов в схемах ступенчатого испарения и, тем самым повысить надежность эксплуатации внутрикотловых устройств за счет улучшения водного режима.

4. На базе комплексных исследований гидравлического и солевого режима и статистической обработки пульсирующих циркуляционных характеристик, разработана модель распределения концентрации солей в выносных СО с двумя циклонами на сторону котла, замкнутых каждый на одну экранную поверхность нагрева. Показано, что в контуре ближнего циклона за счет переброса котловой воды (КВ) из дальнего циклона, вызванного пульсацией расходов в экранных трубах, концентрация солей приблизительно в два раза выше, чем была бы, во второй ступени при трехступенчатой схеме испарения, а в контуре дальнего циклона концентрация приблизительно в три раза выше, чем в ближнем циклоне.

Использование научно-обоснованных закономерностей модели распределения концентрации солей в солевом отсеке позволило объяснить и устранить причины повреждений испарительных труб в энергетических котлах многих типов.

5. Разработана уточненная методика расчета линий солевого выравнивания (ЛСВ), которая раскрыла несоответствие в обосновании применения ЛСВ в существующей методике с условиями естественной циркуляции в двусторонних СО при перекосах по теплу между их панелями и показывающая, что эти линии при перекосах по теплу между панелями СО не приводят к снижению солевых

перекосов. Достоверность разработанной методики расчета подтверждена экспериментально на котле ТГ-104. Показано, что ЛСВ не устраняют солевые перекосы между отсеками.

6. Анализ различных схем включения линий солевой кратности (ЛСК) между солевыми и чистыми отсеками показал недостаточную в большинстве случаев эффективность этих линий. Выполненные в диссертации исследования ЛСК позволили уточнить методику их расчета, оптимизировать место включение в циркуляционные контуры котла и тем самым повысить их эффективность.

7. Исследования сепарационных устройств и выполненные расчеты котлов высокого давления с барботажно-промывочными устройствами (БПУ) показали, что при нормативном качестве питательной воды (ПВ) целесообразность применения БПУ необязательна для котлов с $P_6 = 15,2$ МПа и соблюдении норм ПТЭ по SiO_2 в ПВ и непрерывной продувке $\geq 0,5$ %.

8. Научно обоснована и разработана эффективная внутрикотловая схема для барабана высокого давления КУ ПК-85. В его водяном объеме без применения перегородок, впервые организована зона наивысших концентраций солей, из которой и выполняется продувка. Отсутствие барботажно-промывочных устройств (БПУ) увеличивает высоту парового объема барабана на 270 мм, а паровую высоту циклонов на 100 мм. Испытания такой сепарационной схемы показали, что качество пара по SiO_2 обеспечивается даже при превышении норм в котловой воде (КВ) в два раза, то есть до 400 мкг/дм^3 , а качество пара по натрию (Na) обеспечивается при превышении норм в питательной воде даже в четыре раза, то есть до 200 мкг/дм^3 .

9. По результатам анализа циркуляционных схем подвода и отвода среды в барабаны типовых котлов ТЭС и исследований гидравлики и распределения концентрации солей в барабанах котлов ТПЕ-208 и ТГ-104 рекомендовано для исключения солевых перекосов по длине барабанов предусматривать при проектировании перебросы среды от места запитки в опускные трубы и ввода пароводяной смеси в барабан на расстояние $2 \div 3$ продольных шагов между рядами опускных труб.

10. Для исключения режимов с ухудшенным теплообменом в топочных испарительных поверхностях нагрева с односторонним обогревом рекомендуется увеличение кратности циркуляции (K) в чистых отсеках котлов с $P_6 = 15,2$ МПа с 4,0 до 4,5, а в выносных солевых отсеках — до 5,0.

11. Для контроля надежности водного режима котлов рекомендуется дополнить объем штатных схем контроля отборами проб котловой воды (КВ):

– по барабану (ЧО) – из опускных труб крайнего ряда левой и правой половины барабана;

– по выносным солевым отсекам (СО) – из линии непрерывной продувки, из опускных труб левых и правых выносных циклонов, даже при наличии в СО линий солевого выравнивания;

– из опускной трубы панели экрана при наличии систематических повреждений в этом экране.

Основное содержание диссертации изложено в следующих соответствующих требованиях ВАК России научных публикациях и патентах

1. **Фёдоров, А.И.** К гидродинамике паровых безбарабанных контуров / А.И. Фёдоров, Е.Ф. Бузников // Теплоэнергетика. – 1989. – № 1. – С. 46–51.

2. **Фёдоров, А.И.** Исследование теплообмена в уравнильной емкости пароводогрейного котла / А.И. Фёдоров, Е.Ф. Бузников, А.А. Верес // Электрические станции. – 1990. – № 3. – С. 32–36.

3. **Фёдоров, А.И.** Экспериментальное исследование распределения влаги в паровом объеме выносного циклона / А.И. Фёдоров // Электрические станции. – 1991. – № 4. – С. 26–31.

4. **Фёдоров, А.И.** Исследование работы рециркуляционных труб в контурах, замкнутых на выносные циклоны / А.И. Фёдоров // Электрические станции. – 1991. – № 10. – С. 42–49.

5. **Фёдоров, А.И.** Исследование циркуляции в мощном паровом контуре с естественной циркуляцией, замкнутом на выносной циклон / А.И. Фёдоров // Электрические станции. – 1992. – № 2. – С. 14–21.

6. **Фёдоров, А.И.** Исследование гидравлических характеристик выносных циклонов с тангенциальным вводом пароводяной смеси / А.И. Фёдоров // Электрические станции. – 1993. – № 1. – С. 2–8.

7. **Фёдоров, А.И.** Совершенствование сепарационных устройств барабанных котлов / А.И. Фёдоров // Электрические станции. – 1997. – № 8. – С. 59–63.

8. **Фёдоров, А.И.** Методика расчета трехступенчатой схемы испарения котловой воды барабанных котлов / А.И. Фёдоров // Электрические станции. – 1997. – № 11. – С. 10–12.

9. **Фёдоров, А.И.** Опыт модернизации котлов среднего давления с целью увеличения их паропроизводительности выше номинальной / А.И. Фёдоров, С.В. Бердин // Промышленная энергетика – 1999. – № 5. – С. 14–16.
10. **Фёдоров, А.И.** О применении безбарабанных котлов / А.И. Фёдоров // Промышленная энергетика. – 1999. – № 8. – С. 49–52.
11. **Фёдоров, А.И.** Опыт перевода водогрейных котлов типов ПТВМ-30М и КВГМ в пароводогрейный режим с выработкой пара и горячей воды в одном агрегате / А.И. Фёдоров, В.А. Овчинников // Промышленная энергетика. – 1999. – № 1. – С. 18–21.
12. **Фёдоров, А.И.** Опыт модернизации барабанных котлов с целью увеличения их паропроизводительности выше номинальной / А.И. Фёдоров // Энергетик. – 1999. – № 11. – С. 30.
13. **Фёдоров, А.И.** Способ повышения качества пара барабанных котлов с выносными ступенями испарения / А.И. Фёдоров, С.В. Бердин // Электрические станции. – 2000. – № 5. – С. 23–24.
14. **Фёдоров, А.И.** Опыт перевода барабанных котлов на пониженные параметры пара / А.И. Фёдоров, С.А. Понасечкин // Электрические станции. – 2001. – № 2. – С. 10–13.
15. **Фёдоров, А.И.** Опыт наладки, испытания и реконструкции внутрикотловых устройств котла БКЗ-75-39 при работе на питательной воде с содержанием до 500 мг/кг / А.И. Фёдоров, С.В. Бердин // Промышленная энергетика. – 2001. – № 1. – С. 24–28.
16. **Фёдоров, А.И.** Исследование причин повреждений экранных труб выносного солевого отсека котла ТПЕ-208 энергоблока 210 МВт / А.И. Фёдоров // Теплоэнергетика. – 2003. – № 4. – С. 17–22.
17. **Фёдоров, А.И.** Анализ причин повреждений экранных труб поверхностей нагрева котла ТПЕ-208 / А.И. Фёдоров // Электрические станции. – 2003. – № 4. – С. 41–46.
18. Опыт реконструкции водогрейного котла типа ПТВМ-30М в паровой режим и результаты комплексных испытаний / А.И. Фёдоров [и др.] // Промышленная энергетика. – 2003. – № 6. – С. 18–22.
19. **Фёдоров, А.И.** О целесообразности применения барботажно-промывочных устройств в барабанных котлах высокого давления / А.И. Фёдоров // Энергетик. – 2004. – № 1. – С. 19–21.
20. **Фёдоров, А.И.** Исследование гидравлики и распределения примесей в циркуляционных контурах и барабане (чистый отсек) котла высокого давления / А.И. Фёдоров // Теплоэнергетика. – 2004. – № 2. – С. 52–57.
21. **Фёдоров, А.И.** Выявление и устранение солевых перекосов в барабанных котлах высокого давления / А.И. Фёдоров // Энергетик. – 2005. – № 7. – С. 18–21.
22. **Фёдоров, А.И.** Исследование гидравлики и распределения примесей в выносном солевом отсеке котла высокого давления / А.И. Фёдоров // Теплоэнергетика. – 2005. – № 9. – С. 44–53.

23. **Фёдоров, А.И.** Анализ влияния конструкции и состояния внутрикотловых устройств на надежность работы барабанных котлов / А.И. Фёдоров, И.П. Петров, Д.А. Тоболь // Электрические станции. – 2006. – № 6. – С. 65–73.

24. **Фёдоров, А.И.** Достаточность штатной схемы химического контроля котловой воды барабанных котлов высокого давления при организации надежного водного режима / А.И. Фёдоров // Энергетик. – 2006. – № 12. – С. 15–18.

25. **Фёдоров, А.И.** Методика расчета схем ступенчатого испарения в барабанных котлах с двухсторонними солевыми отсеками / А.И. Фёдоров // Теплоэнергетика. – 2007. – № 4. – С. 46–54.

26. **Фёдоров, А.И.** Проверка эффективности паровой обдувки топочных испарительных поверхностей нагрева пылеугольного котла БКЗ-420-140-6 при помощи температурных вставок / А.И. Фёдоров, Е.А. Егоров, А.А. Хачатрян // Энергетик. – 2011. – № 6. – С. 32–34.

27. Расчет допустимой толщины стенки испарительных поверхностей нагрева паровых котлов с использованием экспериментальных данных / А.И. Фёдоров [и др.] // Электрические станции. – 2011. – № 7. – С. 21–27.

28. **Фёдоров А.И.** Результаты наладки котла ДЕ-25-24-380 ГМ / А.И. Фёдоров // Промышленная энергетика. – 2013. – № 3. – С. 46–50.

29. **Фёдоров, А.И.** Опыт применения и результаты исследований линии регулирования солевой кратности между солевыми и чистыми отсеками в барабанных котлах высокого давления / А.И. Фёдоров // Теплоэнергетика. – 2013. – № 12. – С. 62–68.

30. **Фёдоров, А.И.** Обоснование причин повреждения экранных труб выносного солевого отсека котла высокого давления / А.И. Фёдоров // Теплоэнергетика. – 2014. – № 10. – С. 32–38.

31. **Фёдоров, А.И.** Исследование влияния продолжительности периодических продувок на надежность элементов котлов / А.И. Фёдоров, И.Г. Филиппов // Электрические станции. – 2014. – № 12. – С. 2–6.

32. **Фёдоров, А.И.** Уточненная методика расчета схем ступенчатого испарения барабанных котлов с выносными солевыми отсеками и ее применение / А.И. Фёдоров // Электрические станции. – 2016. – № 2. – С. 10–18.

33. **Федоров, А.И.** Влияние температуры питательной воды на надежность работы барабанных котлов высокого давления / А.И. Федоров, Д.А. Баев // Электрические станции. – 2016. – № 7. – С. 28–32.

34. **Фёдоров, А.И.** К методике расчета линий солевого выравнивания между солевыми отсеками барабанных котлов ТЭС / А.И. Фёдоров // Электрические станции. – 2021. – № 3. – С. 17–22.

35. **Фёдоров, А.И.** Обобщение исследований гидравлических и теплохимических режимов в сепарационных устройствах, выносных солевых отсеках и циркуляционных контурах котлов ТЭС / А.И. Фёдоров // Теплоэнергетика. – 2021. – № 6. – С. 33–44.

Патенты

1. **А.С. 1095016 СССР, МКИЗ F 22 В 33/18.** Котельная установка / Бузников Е.Ф., Верес А.А., Фёдоров А.И. [др.]. – № 3352547/24-06; заявл. 28.10.1981; опубл. 30.05.1984, Бюл. № 20. – 3 с.

2. А.С. 1125438 СССР, МКИЗ F 22 В 37/32. Выносной центробежный сепаратор пара / Бузников Е.Ф., Фёдоров А.И., Верес А.А. [др.]. – № 3666038/24-06; заявл. 23.10.1983.; опубл. 23.11.1984, Бюл. № 43. – 3 с.

3. А.С. 1195130 СССР, МКИЗ F 22 В 33/18. Комбинированный пароводяной котел / Бузников Е.Ф., Фёдоров А.И., Крылов А.К. [др.]. – № 3750078/24-06; заявл. 08.06.1984.; опубл. 30.11.1985, Бюл. № 44. – 3 с.

4. Пат. 2703144 Российская Федерация, МПК F22В 37/22. Устройство для охлаждения парового объема барабана между уровнем воды и барботажно-промывочным устройством / Федоров А.И., Егоров Д.В., Картышов А.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «ВТИ», «Интер РАО - Электрогенерация». – № 2019104235; заявл. 14.02.2019; опубл. 16.10.2019, Бюл. № 29. – 14 с.

Основные обозначения и сокращения

D_k – паропроизводительность котла, т/ч; P – давление, МПа; t_s – температура насыщения, °С; i', r – энтальпия кипящей воды и скрытая теплота парообразования, кДж/кг; ρ', ρ'' – плотность воды и пара на линии насыщения, кг/м³; G – расход воды, т/ч; d – диаметр трубы, барабана, м; s – толщина стенки, мм; f – площадь сечения, м²; w_o – скорость циркуляции, м/с; w''_{oc} – осевая подъемная скорость пара, м/с; ρw – массовая скорость, кг/м²с; K – кратность циркуляции, кг/кг; $\Delta H_{\text{ц}}^{\text{бл}}$, $\Delta H_{\text{ц}}^{\text{д}}$ – уровни воды в ближнем и дальнем циклонах, относительно уровня воды в барабане, мм вод. ст; $p = (D_{\text{н.пр}}/D_k) \cdot 100\%$ – непрерывная продувка в % от паропроизводительности котла; ω – влажность пара (коэффициент механического уноса), %; k – коэффициент избирательного уноса, %; S – общее солесодержание, мг/дм³; SiO_2 – концентрация кремнекислоты, мг/дм³; PO_4^{3-} – концентрация фосфатов, мг/дм³; Na – концентрация натрия, мкг/дм³; рН – водородный показатель (отрицательный логарифм концентрации водородных ионов) $n_I = D_I/D_k \cdot 100\%$, $n_{II} = D_{II}/D_k \cdot 100\%$ – относительные паропроизводительности чистого и солевого отсеков, %; $Re_{\sigma} = \frac{W_{\sigma} \cdot d_{\text{экв}}}{\nu}$ – критерий Рейнольдса

барабана

ПТЭ – правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ; ТЭС – тепловая электрическая станция; ПГУ – парогазовая установка; КУ – котел-утилизатор; ВД – высокое давление; ПП – пароперегреватель; ВЭ – водяной экономайзер; ПВД – подогреватель высокого давления; ПВ – питательная вода; КВ – котловая вода; НП – насыщенный пар; ЧО – чистый отсек; СО – солевой отсек; ВЦ – выносной циклон; ЛСК – линия солевой кратности; ЛСВ – линия солевого выравнивания; СУ – сепарационные устройства; БПУ – барботажно-промывочное устройство; ПВС – пароводяная смесь; ЗЭ, ФЭ и БЭ – задний, фронтальной и боковой экраны.

Индексы: б – барабан; КВ_I, КВ_{II}, КВ_{III} – котловая вода первой, второй и третьей ступени испарения; н.пр – непрерывная продувка; оп – опускная труба; э – экран; отв – отводящая система; л, пр – левый и правый; Ц₁, Ц₂ – первый и второй циклоны; 1уч, 2уч – участки опускной системы; ВП₁, ВП₂ – первая и вторая водоперепускная труба; ПП₁, ПП₂ – первая и вторая пароперепускная труба; бл, д – ближний и дальний циклоны.

ПМБ ОАО «ВТИ», Российская Федерация, 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14.
Подписано в печать: 08.07.2021. Формат 60x84 1/16. Объем 3,0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 159.
