

«УТВЕРЖДАЮ»
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»
Проректор по научной работе
В.К. Драгунов



(Handwritten signature)

09

2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский университет
«МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва)

на диссертацию Федорова Алексея Ивановича

**«Научно-техническое обеспечение эффективности сепарационных
устройств, выносных солевых отсеков и циркуляционных контуров
барабанных котлов ТЭС»,**

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по
специальности 05.14.14 – Тепловые электрические станции, их
энергетические системы и агрегаты

1. Актуальность темы диссертации

Предметом исследования являлись внутрикотловые процессы в сепарационных устройствах, выносных солевых отсеках и циркуляционных контуров барабанных котлов ТЭС.

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

Основными задачами работы являлось проведение экспериментальных исследований гидравлических и теплехимических режимов во внутрикотловых устройствах на действующих котлах ТЭС и на их основе разработка методик расчета схем ступенчатого испарения с двухсторонними СО, линиями солевого выравнивания, моделей процессов в выносных СО с двумя парами циклонов и замкнутых на одну экранную поверхность нагрева, моделировании физических процессов в водяном объеме барабанов, обобщение исследований линий солевой кратности и оптимизация места их включения в циркуляционные контуры котла для повышения их эффективности.

2. Научная новизна основных положений диссертации

– Разработана и экспериментально проверена уточненная методика расчета схем ступенчатого испарения с двухсторонними СО при перебросах из СО в чистый. На ее основе выполнен анализ и объяснены причины повреждаемости котлов ТЭС.

– Впервые на основании результатов исследования гидравлического и солевого режима 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 линий солевой кратности включенных между чистым и солевым отсеками и разработаны рекомендации и технические решения по их эффективному использованию.

– Разработана и экспериментально проверена уточненная методика расчета линии солевого выравнивания в СО. Экспериментально установлено, что линии солевого выравнивания при перекосах по теплу между левыми и правыми панелями СО не приводят к снижению солевых перекосов.

– По результатам исследования обоснована целесообразность отказа от применения барботажных промывочных устройств в котлах ВД при соблюдении норм ПТЭ по качеству питательной воды.

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

– Впервые путем 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. С учетом этого оптимизирована внутрикотловая схема барабанных котлов в том числе и котлов-утилизаторов ПГУ, с одноступенчатым испарением.

– Научно обосновано и экспериментально доказано, что в барабанах котлов с одноступенчатым испарением с помощью конструктивных мероприятий можно создать зону с наибольшей концентрацией солей без применения перегородок, из которой и целесообразно выполнять непрерывную продувку, повышая эффективность внутрикотловой схемы.

– 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 температурного режима для котлов с $P_6 = 15,2$ МПа обосновано увеличение допустимой кратности циркуляции (K) с 4 до 4,5 для чистых отсеков и до 5,0 для выносных СО.

3. Обоснование и достоверность основных выводов и результатов работы

Приведенные в диссертации результаты и выводы научно обоснованы и аргументированы, получены на основании большого объема экспериментальных исследований на барабанных котлах ТЭС с использованием современных измерительных устройств. Обоснованность и непротиворечивость научных положений исследования так же обеспечивается теоретической и методологической основой, которую составляют труды отечественных и зарубежных ученых. Подтверждением основных результатов работы 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 выносных циклонах и барабанах котлов.

4. Практическая ценность полученных результатов

Результаты работы внедрены:

– При разработке сепарационных устройств для двух барабанов ВД без барботажного промывочного устройства для КУ ПК-85 с одноступенчатой схемой испарения ПГУ Новогорьковской ТЭЦ.

– При реконструкции сепарационных устройств котла БКЗ-75-39 Сакской ТЭЦ для обеспечения надежной работы с солесодержанием питательной воды $S_{\text{пв}} < 500 \text{ мг/дм}^3$ и $p < 5,0 \%$.

– При реконструкции сепарационных 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».

5. Оценка содержания диссертации, ее завершенность

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка. Общий объем диссертации составляет 327 страниц машинописного текста содержащих 132 рисунка и 27 таблиц. Библиографический список на 19 страницах включает 183 наименования.

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 и схем барабанных котлов ТЭС и выполнен анализ их работы.

В отечественной энергетике, большинство котлов, выполняется со ступенчатым испарением котловой воды. При расчетах схем ступенчатого испарения, принимается, что солесодержание котловой воды последней ступени испарения равняется солесодержанию непрерывной продувки ($S_{кв\text{ II(III)}} = S_{н.пр}$), а уравнения солевого баланса составляются как для односторонних СО, тогда как большинство двухсторонние. Это приводит к искажению распределения концентрации солей в ступенях испарения. 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 режим в СО, имеющем по два или три циклона на сторону котла гораздо сложнее, чем при одном циклоне на сторону и изучен недостаточно. На всех котлах ВД со ступенчатым испарением устанавливаются линии солевой кратности и линии

солевого выравнивания. Последние были разработаны для выравнивания концентрации солей между двухсторонними СО. Опыт применения линий солевой кратности показал, что их эффективность очень низкая, что связано прежде всего с неправильным включением их в циркуляционные схемы котлов. Для устранения этих трудностей и корректировки имеющихся методик расчета ЛСК и ЛСВ необходимы были дополнительные исследования. 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 тепломеханического режима являлись целью комплексных исследований, приведенных в диссертации.

Во второй главе приведены результаты комплексных исследований гидравлического и тепломеханического режимов в барабанах, выносных солевых отсеках и циркуляционных контурах замкнутых на них. На основании исследований промышленных котлов установлено, что даже при небольших продольных скоростях воды в барабанах равных 0,6 – 0,8 см/с скорость турбулентной диффузии недостаточна для выравнивания концентрации солей по длине барабана. Впервые на основании результатов исследований 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 с верхним и нижним коллекторами без перегородок. Исследования показали, что концентрация солей распределяется таким образом, что в контуре ближнего циклона она приблизительно в два раза выше, чем была бы во второй ступени при трехступенчатом испарении, а в контуре дальнего циклона концентрация приблизительно в три 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 меняется в следствии

циркуляционных пульсаций. 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 теплехимических процессов в схемах ступенчатого испарения и тем самым повысить надежность эксплуатации внутрикотловых устройств за счет улучшения водного режима. 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. Анализ различных схем включения линий солевой кратности (ЛСК) между соевыми и чистыми отсеками показал недостаточную в большинстве случаев эффективность этих линий. Выполненные в диссертации исследования ЛСК позволили уточнить методику их расчета, оптимизировать место включения в циркуляционные контуры котла и тем самым повысить их эффективность. Экспериментально установлено, что для исключения солевых перекосов по длине барабана необходимо применять перебросы среды от места запитки в опускные трубы до ввода ПВС в барабан на расстоянии $2 \div 3$ продольных шагов между рядами опускных труб.

В третьей главе приведены результаты исследований и разработке эффективных сепарационных устройств барабанных котлов ТЭС. 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: а) для котлов ГРЭС при $\text{SiO}_2^{\text{пв}} < 30$ мкг/дм³ (норма ПТЭ) и продувке $p > 0,5$ %; б) для котлов ТЭЦ с производственными отборами при $\text{SiO}_2^{\text{пв}} < 50$ мкг/дм³ и $p > 0,5$ %; с соблюдением качества пара согласно норм ПТЭ. Отказ от применения БПУ в сепарационных схемах улучшает гидравлику в барабане и циркуляционных контурах и повышает надежность котлов. Было проведено математическое моделирование физических процессов в водяном объеме барабана с использованием программного комплекса Ansys Fluent. Система уравнений, описывающих движение жидкости, теплопередачу и диффузию примесей в турбулентном потоке решалась методом конечных объемов. Было получено распределение скоростей, концентрации солей и температур в объеме барабана. На основании исследований гидравлики и солевого режима в барабанах и математического моделирования была разработана внутрикотловая схема для КУ ПК-85 без барботажного промывочного устройства, показавшая высокую эффективность.

В четвертой главе исследованы вопросы надежности испарительных поверхностей нагрева топочных экранов. Исследовано влияние на надежность поверхностей нагрева площади сечения трубы питания СО, площади сечения вводов в выносные циклоны, места вывода непрерывной продувки из выносного СО, а так же водно-химического режима. Разработана расчетно-экспериментальная методика определения допустимой по условиям прочности толщины стенки лобовой, боковой и тыльной части испарительных труб с применением температурных вставок оригинальной конструкции и фактических характеристик прочности. Показано, что с применением этой методики обеспечивается надежность при меньшей допустимой толщине стенки, чем при упрощенной методике. Исследована и обоснована величина минимально-допустимой кратности циркуляции для топочных испарительных поверхностей нагрева с односторонним обогревом

для котлов с давлением $P_6 = 15,2$ МПа для чистых отсеков до 4,5, а для выносных СО до 5,0.

Исследована причина повреждения труб одностороннего выносного СО с 2-мя циклонами с последовательным питанием по воде и замкнутых на одну экранную поверхность нагрева. Показано, что при выполнении непрерывной продувки из ближнего циклона и нормировании водного режима по этому циклону, концентрация солей в дальнем циклоне приблизительно в 3 раза выше, чем в ближнем, что приводило к повышению концентрации фосфатов выше допустимых величин в особенности в периоды разгрузки котлов («хайд аут фосфатов») что и служило причиной повреждения труб из-за коррозионных процессов

В пятой главе исследовано влияние режимов и условий эксплуатации на надежность работы котлов. Выполненное исследование влияния температуры ПВ показало, что при ее снижении увеличивается величина конденсации пара на БПУ, что ведет к снижению кратности циркуляции, а значит и надежности. При отказе от применения БПУ К увеличивается на $0,5 \div 0,8$. Исследование снижения давления в котле ниже номинального при $Q_K = \text{const}$, показало увеличение кратности циркуляции в контурах, а значит и повышению надежности. Исследование влияния перекоса по расходу газа по горелкам показало, что различие в концентрации солей между панелями из-за различия в тепловосприятности может составлять 40% и более, поэтому работа котлов при перекосах по горелкам или из-за шлакования поверхностей нагрева приводит к снижению надежности. Экспериментально установлено, что при перекосах по теплу между левыми и правыми панелями СО линии солевого выравнивания не устраняют солевые перекосы. Исследование подачи питательной воды в линию ввода фосфатов в барабан показало, что химический перекося по длине барабана снижается приблизительно в два раза. Исследование влияния продолжительности периодических продувок выносных СО на надежность гидравлики и температурного режима поверхностей нагрева, замкнутых на них показало,

что при продувке через штуцер $d_{\text{вн}} = 20$ мм даже до 2 мин надежность циркуляционных контуров не снижается. Наличие ЛСВ приводит к меньшему снижению уровней воды в выносных циклонах.

6. Апробация результатов работы

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. В опубликованных материалах достаточно полно отражены основные результаты диссертационной работы. По результатам работы сделано 12 докладов на международных и российских конференциях и семинарах.

7. Замечания и вопросы по работе

1. В работе много говорится о конденсации пара на барботажном промывочном устройстве. В то же время в работе нет данных по контактному теплообмену, а также про определяющие его характеристики сказано очень мало. В том числе нет данных по оценке реально сконденсировавшегося пара во время промывки на разных котлах.

2. Расчёт линии солевой кратности в п. 2.9 приведён без учёта влияния изменения расхода между отдельными контурами циркуляции перебрасываемой среды через линии солевой кратности. При использовании разработанной методики для оценки её работы требуется привести примерную погрешность расчётного метода из-за использования указанного допущения.

3. Ввод фосфатов в питательную воду может привести к нарушению работы экономайзера. Как этот фактор был учтён в работе при проведении экспериментальных исследований?

8. Заключение по диссертации

Указанные замечания не затрагивают существа основных положений, выводов и рекомендаций диссертации.

Тема, содержание и полученные результаты диссертационной работы соответствуют 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»

Диссертационная работа выполнена на высоком теоретическом и профессиональном уровне и представляет собой комплекс знаний, описывающих взаимосвязанные процессы гидравлического, температурного и солевого режима в барабанах, выносных солевых отсеках и циркуляционных контурах, замкнутых на них. Этот комплекс включает в себя методики, экспериментальные данные, модели процессов и результаты расчетных исследований. В работе изложены научно-обоснованные технические и технологические решения внедрение которых вносит значительный экономический эффект в развитие энергетики страны.

Докторская диссертация Федорова Алексея Ивановича «Научно-техническое обеспечение эффективности сепарационных устройств, выносных солевых отсеков и циркуляционных контуров барабанных котлов ТЭС» представляет собой научно-квалификационную работу и соответствует критериям, предъявляемым к докторским диссертациям (п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»), а ее автор заслуживает присвоение ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты».

Отзыв на диссертацию и автореферат подготовлен заведующим кафедрой Моделирования и проектирования энергетических установок, рассмотрен и утверждён на расширенном заседании кафедры с присутствием специалистов кафедры Теоретических основ теплотехники (Протокол №5 от 23.09.2021 г.)

Заведующий кафедрой
Моделирования и проектирования
энергетических установок



К.А. Плешанов

Подпись К.А. Плешанова удостоверяю



ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
УПРАВЛЕНИЯ ПО РАБОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ
И.М. ПОЛЕВАЯ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
университет «МЭИ»**

111250, Россия, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово,
ул. Красноказарменная, д.14, стр.1

E-mail: universe@mpei.ac.ru, тел. +7 495 362-70-01, сайт <https://mpei.ru>

✓ С отзывами заведующий
организации ознакомлен
27.09.2021

Секретарь

