

ОТЗЫВ

официального оппонента Ледуховского Григория Васильевича
на диссертацию Фёдорова 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»

Актуальность темы диссертации

Барабанные паровые котлы в настоящее время являются безальтернативным источником тепловой энергии в виде пара на тепловых электростанциях (ТЭС) докритического начального давления паросилового цикла, а также в паротурбинных подстроиках парогазовых установок. Надежность котлов напрямую определяет надежность ТЭС в целом. От эффективности котла в существенной мере зависят удельные расходы топлива на отпуск электрической и тепловой энергии. При этом вопросы надежности котельного оборудования выходят на первый план: котел как масштабный и одновременно наиболее теплонапряженный элемент ТЭС характеризуется существенными тепловыми и гидравлическими разверками испарительных поверхностей и, в меньшей степени, прочих поверхностей водопарового и газовоздушного трактов.

С точки зрения надежности теплонапряженных поверхностей котла, определяющей является эффективность ведения водно-химического режима средствами предварительной очистки и деаэрации добавочной воды, коррекционной обработки котловой воды, а также такой организацией теплогидравлических условий работы поверхностей нагрева, которые обеспечивают максимальное подавление коррозионных и накипных процессов. При этом используются такие внутрикотловые устройства и элементы, как циркуляционные контуры, продувочные устройства, солевые и чистые отсеки, выносные циклоны, линии переброса котловой воды, линии солевой кратности и солевого выравнивания, сепарационные устройства и др. Неэффективная работа этих устройств и элементов нередко приводит к авариям и эксплуатационным нарушениям.

Несмотря на системную и глубокую проработку теоретической базы отечественного котлостроения, к настоящему времени остается нерешенным ряд задач, связанных с использованием циркуляционных контуров, барабанов и внутрибарабанных устройств, выносных солевых отсеков котлов. В определенной степени это естественно и связано со сложностью рассматриваемых задач: при их решении необходимо рассматривать совмещенные процессы гидродинамики, тепломассообмена, химической кинетики примесей котловой воды и металла конструкционных элементов, реализуемые в нестационарных условиях.

Предметом исследования в рассматриваемой диссертации являются внутрикотловые процессы в сепарационных устройствах, выносных солевых отсеках и циркуляционных контурах барабанных котлов ТЭС. Цель исследования состоит в создании научных и методических основ процессов во внутрикотловых устройствах путем комплексных исследований гидравлических и теплехимических режимов и разработке на

их базе методик расчета, моделей процессов, рекомендаций и технических решений по повышению надежной и эффективной работы сепарационных устройств барабанов, выносных солевых отсеков и циркуляционных контуров паровых котлов ТЭС.

Таким образом, тему диссертации Федорова А.И. следует признать актуальной, соответствующей задачам научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России. Актуальность работы дополнительно обусловлена тем, что рассматриваемые в ней проблемы носят общесистемный характер и потому полученные результаты могут быть в высокой степени тиражируемыми.

Общая характеристика и оценка содержания диссертации

Для рассмотрения представлены следующие материалы: диссертация на 327 страницах машинописного текста формата А4, состоящая из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы (183 наименования); автореферат на 52 страницах машинописного текста формата А5.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи работы, заявлена научная новизна и практическая ценность результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснованы применяемые в работе методы исследования и достоверность полученных результатов, отмечен личный вклад автора в получение результатов, приведены сведения об апробации результатов работы, а также данные о публикациях по теме диссертации.

В первой главе выполнен аналитический обзор опубликованных данных о внутрикотловых устройствах и схемах барабанных котлов ТЭС, выполнен анализ опыта их эксплуатации.

В отечественной энергетике большинство паровых котлов выполняется со ступенчатым испарением котловой воды. При расчетах схем ступенчатого испарения традиционно принимается, что солесодержание котловой воды последней ступени испарения соответствует солесодержанию воды непрерывной продувки, а уравнения солевого баланса составляются как для односторонних солевых отсеков. При этом большинство солевых отсеков энергетических котлов выполняются двухсторонними. Такое несовершенство методики расчета схем ступенчатого испарения приводит к искажению распределения концентрации солей в ступенях испарения.

Большинство отечественных паровых котлов выполнены с выносными солевыми отсеками, которые, в зависимости от мощности и схем включения выносных циклонов, проектируются по одному, по два или по три на сторону котла. Ясно, что гидравлический и солевой режим в солевом отсеке, имеющем по два или три циклона на сторону котла гораздо сложнее, чем при одном циклоне на сторону, и изучен недостаточно.

На всех котлах высокого давления со ступенчатым испарением устанавливаются линии солевой кратности и линии солевого выравнивания. Линии солевого выравнивания разрабатывались для выравнивания концентрации солей между двухсторонними солевыми отсеками. Опыт применения линий солевой кратности показал их низкую эффективность, что связано прежде всего с неправильным включением их в циркуляционные схемы котлов. Для устранения этих трудностей и корректировки имеющихся

методик расчета линий солевой кратности и линий солевого выравнивания необходимы дополнительные исследования.

Разрешение указанных проблем, разработка научно обоснованных методик расчета и моделей, оптимизация конструктивных решений и в конечном итоге — повышение надежности и эффективности гидравлического и тепlohимического режимов котлов являлись целью комплексных исследований, выполненных в рамках диссертации.

Во второй главе приведены результаты комплексных исследований гидравлического и тепlohимического режимов в барабанах котлов, выносных солевых отсеках и циркуляционных контурах, замкнутых на них. На основании исследований промышленных котлов установлено, что даже при небольших продольных скоростях воды в барабанах (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 солевых отсеках с двумя выносными циклонами на сторону котла, каждый из которых замкнут на одну экранную поверхность нагрева с верхним и нижним коллекторами без перегородок. Проведенные 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 солей приблизительно в три раза выше, чем в контуре ближнего циклона. Повышенная концентрация в контуре ближнего циклона вызвана перебросом в него части котловой воды контура дальнего циклона по экраным трубам, число которых меняется вследствие циркуляционных пульсаций.

Автором 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), линиям солевой кратности и опускным трубам, при солевых перекосах по длине барабана. Выявлено несоответствие в распределении концентрации солей в ступенях испарения результатам расчета по существующим методикам. Авторская методика более полно отражает особенности гидравлических и тепlohимических процессов в схемах ступенчатого испарения. Её применение позволит повысить надежность эксплуатации внутрикотловых устройств за счет улучшения водного режима.

Раскрыто имеющееся в существующей методике РТМ 108.030.05-75 несоответствие в обосновании применения линий солевого выравнивания с условиями естественной циркуляции в двусторонних солевых отсеках при перекосах по тепловой нагрузке их панелей. Разработана уточненная методика расчета линий солевого выравнивания. Показано, что эти линии при перекосах по тепловой нагрузке между панелями солевых отсеков не только приводят к снижению солевых перекосов, но даже и увеличивают их. Достоверность разработанной методики расчета подтверждена экспериментально на котле ТГ-104.

Анализ различных схем включения линий солевой кратности между солевыми и чистыми отсеками показал недостаточную в большинстве случаев эффективность этих линий. Выполненные в диссертации исследования котлов с линиями солевой кратности 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 пароводяной смеси в барабан на расстоянии 2÷3 продольных шагов между рядами опускных труб.

В третьей главе приведены результаты исследований и разработки эффективных сепарационных устройств барабанных котлов ТЭС.

Результаты исследований и расчета солевых балансов для котлов с давлением в барабане 15,2 МПа и двухступенчатой схемой испарения показали, что барботажно-промывочные устройства на них можно не устанавливать, с соблюдением химического качества пара согласно установленных норм, в следующих случаях:

а) для котлов ГРЭС при концентрации в питательной воде кремниевой кислоты в пересчете на $\text{SiO}_2 < 30 \text{ мкг/дм}^3$ и продувке $p > 0,5 \%$;

б) для котлов ТЭЦ с производственными отборами пара при концентрации в питательной воде кремниевой кислоты в пересчете на $\text{SiO}_2 < 50 \text{ мкг/дм}^3$ и продувке $p > 0,5 \%$.

Отказ от применения барботажно-промывочных устройств в сепарационных схемах улучшает гидродинамические условия в барабане и циркуляционных контурах и повышает надежность котлов.

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. Получено распределение скоростей, концентрации солей и температур в объеме барабана. На основании исследований разработана внутрикотловая схема для котла-утилизатора ПК-85 без барботажно-промывочных устройств, показавшая высокую эффективность.

Четвертая глава посвящена вопросам надежности испарительных поверхностей нагрева топочных экранов. Исследовано влияние на надежность поверхностей нагрева площади сечения трубы питания солевого отсека, площади сечения вводов в выносные циклоны, места вывода непрерывной продувки из выносного солевого отсека, 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 надежность обеспечивается при меньшей допустимой толщине стенки, чем при расчетах по упрощенной методике.

Обоснована минимально-допустимая кратность циркуляции для топочных испарительных поверхностей нагрева с односторонним обогревом для котлов с давлением в барабане 15,2 МПа, которая составила для чистых отсеков — до 4,5, для выносных солевых отсеков — до 5,0.

Исследована причина повреждения труб одностороннего выносного солевого отсека с двумя замкнутыми на одну экранную поверхность нагрева циклонами при последовательном питании по воде. Показано, что при выполнении непрерывной продувки из ближнего циклона и нормировании водного режима по этому циклону концентрация солей в дальнем циклоне оказывалась приблизительно в 3 раза выше, чем в ближнем, что приводило к повышению концентрации фосфатов выше допустимых значений, 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 питательной воды показало, что при её уменьшении увеличивается доля пара, конденсирующегося на барботажно-промывочном устройстве, что ведет к снижению кратности циркуляции, а значит и надежности. При отказе от применения барботажно-промывочных устройств кратность циркуляции увеличивается на $0,5 \div 0,8$.

Исследование снижения давления в котле ниже номинального при постоянной нагрузке показало, что при этом увеличивается кратность циркуляции в контурах, при этом надежность повышается.

Исследование влияния перекоса по расходу топлива (газа) по горелкам показало, что различие в концентрации солей между панелями из-за различия в тепловосприимчивости может достигать 40% и более, поэтому работа котлов при перекосах по горелкам или из-за шлаковки поверхностей нагрева приводит к снижению надежности. Экспериментально установлено, что при перекосах по тепловой нагрузке между левыми и правыми панелями солевого отсека линии солевого выравнивания не устраняют солевые перекосы.

Исследование подачи питательной воды в линию ввода фосфатов в барабан показало, что химический перекоп по длине барабана снижается приблизительно в два раза.

Исследование влияния продолжительности периодических продувок выносных солевых отсеков на надежность гидродинамики и температурного режима замкнутых на них поверхностей нагрева показало, что при продувке через штуцер внутренним диаметром 20 мм даже до 2 мин надежность циркуляционных контуров не снижается. Наличие линий солевого выравнивания приводит к меньшему снижению уровней воды в выносных циклонах.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертации.

Научная новизна диссертации. Следует согласиться с заявленными автором тезисами, характеризующими научную новизну диссертации.

Проведен комплекс расчетно-экспериментальных исследований, в ходе которых получены следующие новые научные результаты:

- разработана уточненная методика расчета схем ступенчатого испарения с двухсторонними солевыми отсеками при перебросах котловой воды из солевого отсека в чистый отсек; проведена экспериментальная проверка предложенной методики, выполнен анализ и объяснены причины повреждаемости котлов ТЭС;
- на основании результатов исследования гидравлического и солевого режимов и статистической обработки пульсирующих циркуляционных характеристик впервые разработана физико-химическая модель распределения концентрации солей в солевых отсеках с двумя выносными циклонами на сторону котла, каждый из которых замкнут на одну экранную поверхность нагрева;
- получены новые расчетные и экспериментальные данные, характеризующие использование линий солевой кратности, включенных между чистым и солевым отсеками, на основе анализа которых разработаны рекомендации и технические решения по их эффективному использованию;
- разработана уточненная методика расчета линий солевого выравнивания в солевых отсеках, учитывающая перекосы по тепловой нагрузке панелей двухсторонних солевых отсеков; проведена экспериментальная проверка предложенной методики;
- получены новые данные, характеризующие целесообразность и условия эффективного применения барботажно-промывочных устройств в котлах высокого давления;
- доказано, что основное влияние на равномерность распределения концентрации солей в барабанах котлов оказывают потоки циркуляционных контуров, замкнутых на барабан, при этом влияние турбулентной диффузии примесей не является определяющим фактором;
- в ходе экспериментальных исследований и численного моделирования физических процессов в барабанах котлов впервые установлено, что скорость турбулентной диффузии примесей меньше продольных скоростей воды в барабанах, вследствие чего снижение (возрастание) концентрации примесей «против потока» не происходит; на основании полученных данных выполнена оптимизация внутрикотловой схемы барабанных котлов, в том числе котла-утилизатора ПГУ, с одноступенчатым испарением.
- научно обосновано и экспериментально доказано, что в барабанах котлов с одноступенчатым испарением путем конструктивных мероприятий без применения перегородок можно создать зону с наибольшей концентрацией солей, из которой и целесообразно выполнять непрерывную продувку, повышая тем самым эффективность внутрикотловой схемы;
- на основе результатов исследований гидравлического и солевого режимов, а также численного моделирования физических процессов в водяном объеме барабанов котлов ТЭС разработана новая эффективная внутрикотловая схема для барабанных котлов-утилизаторов высокого давления ПГУ, лишенная барботажно-промывочных устройств и работающая с кратностью циркуляции менее 5;
- в ходе исследований на котлах высокого давления и стендовых установках выявлены условия, обеспечивающие надежный температурный режим в топочных испарителях;

рительных поверхностях нагрева с односторонним обогревом; для котлов с давлением в барабане 15,2 МПа обосновано увеличение допустимой кратности циркуляции с 4 до 4,5 для чистых отсеков и до 5,0 для выносных солевых отсеков.

Практическая значимость диссертации обусловлена тем, что все технические и технологические предложения, выдвинутые автором, ориентированы на преодоление конкретных производственных проблем, имеющих общесистемный характер в отечественной энергетике. Разработанные методики расчета элементов котлов, а также полученные автором качественные и количественные зависимости могут быть напрямую использованы при проектировании новых и модернизации существующих котельных установок с барабанными котлами. Высокая практическая значимость результатов работы подтверждена их широким внедрением:

- при разработке сепарационных устройств для двух барабанов высокого давления без барботажно-промывочных устройств для котла-утилизатора ПК-85 с одноступенчатой схемой испарения ПГУ Новогорьковской ТЭЦ;

- реконструкции сепарационных устройств котла БКЗ-75-39 Сакской ТЭЦ для обеспечения надежной работы с солесодержанием питательной воды менее 500 мг/дм^3 и продувкой менее 5,0 %;

- реконструкции сепарационных устройств чистых и выносных солевых отсеков котлов ТПЕ-208 Череповецкой, Псковской ГРЭС и ТГ-104 Сургутской ГРЭС-1 для повышения их надежности и эффективности;

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

- разработке отраслевого нормативного документа СО 34.26.729 «Рекомендации по наладке внутрикотловых сепарационных устройств барабанных котлов»;

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

Достоверность и обоснованность основных выводов и результатов

Приведенные в диссертации результаты и выводы научно обоснованы и аргументированы, получены на основании большого объема экспериментальных исследований на барабанных котлах ТЭС, стендовых установках. При проведении экспериментов использованы современные измерительные устройства. Обоснованность и непротиворечивость научных положений исследования обеспечивается также 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 ТЭС.

Замечания и вопросы по диссертации:

1. В первой главе диссертации автор приводит обстоятельный анализ оптимальности схем циркуляции и средств обеспечения водно-химического режима котлов на основании отечественного опыта их проектирования и эксплуатации. При этом недостаточное внимание уделено зарубежному опыту. Кроме того, целесообразным было бы приведение в рамках первой главы статистики по частоте возникновения и типам повреждений котлов, связанных с работой сепарационных устройств, выносных солевых отсеков и циркуляционных контуров.

2. Приведенные в диссертации экспериментальные данные следовало бы дополнить сведениями о методиках выполнения эксперимента, условиях их проведения, используемых методах измерения и приборах, а также о характеристиках правильности и прецизионности результатов измерений. Без этой информации невозможно оценить, в какой степени наблюдаемые различия в значениях тех или иных показателей обусловлены внешними причинами (тепловой, гидравлической, солевой разверкой, пульсациями циркуляции и т.п.), а в какой – методологическими и методическими допущениями, принятыми при организации экспериментальных исследований, а также степенью неопределенности экспериментальных данных.

3. При разработке методики расчета схем ступенчатого испарения в котлах с двухсторонними солевыми отсеками (п. 2.7 диссертации) в качестве допущений принято отсутствие избирательного выноса солей с паром из ступеней испарения и отсутствие капельного уноса солей с паром (стр. 107). Насколько эти допущения обоснованы, учитывая, что на стр. 108 автор указывает, что выявленное увеличение концентрации солей в чистом отсеке при переброске котловой воды из солевого отсека приводит к увеличению выноса солей с паром? По опыту эксплуатации котлов высокого давления, избирательный унос, например, кремниевой кислоты может достигать 4 % или даже несколько более.

4. При разработке эффективной внутрикотловой схемы для котла-утилизатора ПК-85 высокого давления (п. 3.2 диссертации) в барабане была организована зона наивысших концентраций солей без применения перегородок (стр. 178); из этой зоны выполнена продувка. Не ясно, какие научные идеи и технические решения положены в основу при создании этой зоны?

5. Каким образом зашламленность дырчатых паропромывочных листов, обсуждаемая в пп. 4.1, 5.5 и др., влияет на работу барботажно-промывочного устройства и режим циркуляции в котле?

6. Глава 5 названа как «Исследование влияния режимов и условий эксплуатации на надежность работы котлов». Однако никаких количественных показателей собственно надежности (в частности, безотказности, судя по направленности рассматриваемой главы диссертации) не представлено. По сути, речь здесь идет о влиянии не на надежность, а на параметры котла и факторы, её определяющие.

Общая оценка диссертации

Наличие указанных частных замечаний не меняет общей положительной оценки 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».

Тема диссертации актуальна. Значимость рассматриваемой проблемы для экономики страны в целом обусловлена тем, что сформулированные в работе задачи имеют общесистемный характер, а результаты их решения являются в высокой степени тиражируемыми.

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 замкнутых на них циркуляционных контурах котлов. Этот комплекс включает в себя методики, экспериментальные данные, модели процессов и результаты расчетных исследований.

Диссертация обладает научной новизной, а полученные результаты имеют высокое практическое значение. Автореферат отражает основное содержание диссертации. Диссертация и автореферат написаны с использованием терминологии, принятой в рассматриваемой отрасли науки и техники, обладают внутренним единством содержания, раскрывают положения, выносимые на защиту, а также содержат сведения о практическом использовании результатов. Личный вклад автора в получение результатов работы не вызывает сомнений.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, следует признать обоснованными и достоверными.

Публикации в открытой печати раскрывают сущность работы, количество публикаций по списку ВАК удовлетворяет требованиям по докторским диссертациям. Работа прошла апробацию на научно-технических конференциях и семинарах различного уровня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация Федорова Алексея Ивановича «Научно-техническое обеспечение эффективности сепарационных устройств, выносных солевых отсеков и циркуляционных контуров барабанных котлов ТЭС» представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны новые научно обоснованные технические и технологические реше-

ния, обеспечивающие повышение надежности и эффективности эксплуатации паровых барабанных котлов ТЭС, что вносит значительный вклад в развитие страны.

Диссертация соответствует требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации «О порядке присуждения ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842 в актуальной редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Федоров Алексей Иванович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты».

Официальный оппонент:

заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции»

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный

энергетический университет

имени В.И. Ленина»,

доктор технических наук, доцент

153003, г. Иваново,

ул. Рабфаковская, д. 34

тел. (4932) 269-696, 269-931,

e-mail: admin@tes.ispu.ru, сайт: <http://ispu.ru/>


20.09.21

Ледуховский

Григорий Васильевич

Подпись Ледуховского Г.В. заверяю:

Учёный секретарь Учёного совета

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный

энергетический университет

имени В.И. Ленина»

153003, г. Иваново,

ул. Рабфаковская, д. 34

тел. (4932) 269-696, 269-931





Ширяева

Ольга Алексеевна

Сотрудник официального
оппонента

д.т.н., доцента Ледуховского Г.В.
ознакомил 27.09.2021

соискатель

 Федоров А.И.