



Открытое акционерное общество
«Научно-производственное объединение по
исследованию и проектированию энергетического
оборудования им. И.И. Ползунова»

(ОАО «НПО ЦКТИ»)

191167, Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 3/6.
Тел. (812) 717-23-79, факс (812) 717-43-00.
ОКПО 05762252. ОГРН 1027809192388
ИНН 7825660956. КПП 784201001
e-mail: general@ckti.ru, www.ckti.ru

31.01.2025 № 30/52

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ОАО «НПО «ЦКТИ»

д.т.н., профессор

Владимир Евгеньевич Михайлов



«31» января 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и
проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова»
(ОАО «НПО ЦКТИ»), г. Санкт-Петербург на диссертацию

Бубнова Кирилла Николаевича

«Совершенствование методов диагностики оборудования паротурбинных установок
ТЭС на основе математического моделирования», представленную на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.4.5 – Энергетические системы и комплексы (технические науки)

Актуальность темы диссертационной работы.

Обеспечение надежной работы и экономичной эксплуатации основного и вспомогательного энергетического оборудования является важной задачей для компаний и организаций в сфере теплоэнергетики. Это особенно значимо в условиях увеличения вероятности аварийных простоев генерирующего оборудования на электростанциях и изменения правил на оптовом рынке электрической энергии и мощности. Для снижения затрат на техническое обслуживание и сокращения времени аварийного простоя энергетического оборудования внедряются системы мониторинга и диагностики технического состояния оборудования в рамках программно-технического комплекса АСУ ТП действующих энергоблоков электростанций. Основными разработчиками указанных систем являются крупные энергетические компании Siemens (Германия), Westinghouse (США), General Electric (США) и др.) и производители программных решений (IBM (США), Oracle (США), SAP (Германия),

AVEVA (Великобритания) и др.]. Среди отечественных разработчиков стоит отметить АО «Ротек Диджитал Солюшнс», ООО «Сайберфизикс», ООО «Кловер Групп» и АО «Силовые машины».

В настоящее время задача перехода на отечественные системы мониторинга и диагностики технического состояния является важной для компаний и организаций в сфере теплоэнергетики. Решение данной задачи позволит обеспечить импортозамещение зарубежных диагностических программных комплексов и повысить устойчивость топливно-энергетического комплекса страны. Поэтому тема, цель и задачи диссертационного исследования, посвященного использованию математических моделей для диагностики технического состояния паровой турбины и теплообменного оборудования системы ее регенерации, являются актуальными.

Структура, объем и основное содержание диссертации.

Диссертация состоит из четырех глав, заключения, списка использованных источников (230 наименований). Материал диссертации содержит 206 страниц машинописного текста, 63 рисунка, 33 таблицы и 2 приложения.

Во введении обоснована актуальность темы исследования. Сформулированы цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Указаны методология и методы исследования, а также степень достоверности результатов проведенных исследований. Представлены положения, выносимые на защиту, информация о реализации и апробации результатов работы, личном вкладе автора, количестве публикаций автора по теме диссертации, структуре и объеме работы.

Первая глава диссертации посвящена аналитическому обзору опубликованных данных по тематике исследования, в частности рассмотрены существующие на сегодняшний день стратегии технического обслуживания энергетического оборудования. В результате анализа требований, предъявляемых к организации тепловых (балансовых) испытаний, а также экспресс-испытаний паровых турбин и теплообменного оборудования системы регенерации высокого давления, выявлено, что соблюдение указанных требований в условиях непрерывного функционирования генерирующего оборудования сопряжено с рядом ограничений. Эти ограничения препятствуют осуществлению оперативного контроля и мониторинга технического состояния энергетического оборудования. В данном случае разработка и реализация математических моделей паровой турбины и вспомогательного теплообменного оборудования паротурбинной установки позволят оперативному персоналу электростанции проводить мониторинг и диагностику технического состояния оборудования на основе эксплуатационных данных контрольно-измерительных приборов. С учетом аналитического обзора существующих подходов к математическому моделированию и расчету тепловой схемы паровой турбины и вспомогательного теплообменного оборудования паротурбинной установки автором отмечена необходимость совершенствования традиционных методов диагностики

оборудования за счет использования математических моделей, разработанных в рамках методологии матричной формализации.

Вторая глава является ключевой частью диссертации как по содержанию представленных результатов, так и по их теоретической значимости. В рамках постановки и решения прямой задачи моделирования разработаны математические модели изменения состояния проточной части паровой турбины и подогревателя системы регенерации высокого давления. Научная новизна указанных моделей заключается в том, что: во-первых, математическая модель изменения состояния проточной части паровой турбины построена с учетом сетки расходов А.В. Щегляева для регулирующей ступени, формулы Стодолы-Флюгеля для отсеков паровой турбины и найденной аппроксимирующей зависимости относительного внутреннего КПД цилиндров турбины в рамках методологии матричной формализации балансовых соотношений энергии и массы; во-вторых, математическая модель трехступенчатого подогревателя системы регенерации высокого давления, разработанная в рамках методологии матричной формализации, позволяет учесть структуру потоков теплоносителей и фазовый переход горячего теплоносителя. На примере паровой турбины типа К-300-240 ЛМЗ (*свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022682363*) и последнего по ходу питательной воды подогревателя типа ПВ-900-380-66 (*свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023684423*) продемонстрирована адекватность предложенных математических моделей для проведения расчетных исследований. С учетом разработанных математических моделей паровой турбины и подогревателя системы регенерации высокого давления сформулирована и решена обратная задача диагностики технического состояния указанного оборудования. Обратная задача диагностики технического состояния решается как многомерная оптимизационная задача с учетом ограниченного объема данных от контрольно-измерительных приборов, установленных на исследуемом оборудовании. Представлены алгоритмы мониторинга и диагностики технического состояния проточной части паровой турбины и подогревателя системы регенерации высокого давления, основанные на решении обратной задачи диагностики, реализованные в виде программных модулей (*свидетельства о регистрации программ для ЭВМ № 2023618286 и № 2023684423*).

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию основного и вспомогательного оборудования паротурбинных установок Костромской ГРЭС и ТЭЦ ВАЗа для адаптации под условия действующего энергетического оборудования и верификации разработанных во второй главе диссертации математических моделей. В качестве исходных данных использованы результаты измерений температуры, давления и расхода теплоносителей, выполненные штатными контрольно-измерительными приборами программно-технического комплекса АСУ ТП. С учетом метрологических характеристик штатных контрольно-измерительных приборов проведена обработка результатов измерений технологических параметров.

Представлены результаты, подтверждающие адекватность разработанных во второй главе математических моделей изменения состояния проточной части паровой турбины и подогревателя системы регенерации высокого давления.

В четвертой главе рассмотрены вопросы практического использования результатов проведенных исследований. На примере паровой турбины типа Т-250/305-240-ДБ УТЗ и последнего по ходу питательной воды подогревателя системы ее регенерации высокого давления типа ПВ-900-380-66 представлены результаты решения обратной задачи диагностики технического состояния указанного оборудования. Приведено описание программного комплекса для расчета и анализа технического состояния паровой турбины и подогревателя системы регенерации высокого давления турбоагрегата К-300-240 ЛМЗ Костромской ГРЭС (*свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024662938*).

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертации в соответствии с поставленными задачами, указаны перспективные направления развития исследования.

В приложении приведены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и акты внедрения результатов исследования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

Изложенные в диссертации результаты научного исследования базируются на применении апробированных методов математического моделирования теплоэнергетического оборудования. Обоснованность и достоверность представленных в диссертации результатов научного исследования обеспечены согласованностью результатов работы с данными, опубликованными в работах других авторов, применением гостированных методов обработки результатов экспериментального исследования, удовлетворительным согласованием результатов экспериментального исследования и данных численного моделирования.

Научные положения, выносимые на защиту, раскрыты в тексте диссертации, опубликованных автором статьях в научных журналах и свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Материалы, достаточно полно отражающие содержание диссертации, опубликованы в 28 научных работах, в том числе в 5 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях. Также получено 9 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана комбинированная математическая модель изменения состояния проточной части паровой турбины, построенная в рамках методологии матричной формализации балансовых соотношений энергии и массы с учетом формулы

Стодолы-Флюгеля и найденной аппроксимирующей зависимости относительного внутреннего КПД паровой турбины от расхода пара, позволяющая определить распределение давления по проточной части при ограниченном объеме экспериментальных данных.

2. Разработан алгоритм решения обратной задачи диагностики технического состояния проточной части паровой турбины на основе комбинированной математической модели, позволяющий оперативно выявить и локализовать неисправности (дефекты) по отсекам проточной части паровой турбины.

3. Разработана матричная математическая модель трехступенчатого регенеративного подогревателя, учитывающая структуру потоков теплоносителей и фазовый переход горячего теплоносителя, позволяющая при ограниченном объеме экспериментальных данных осуществить решение обратной задачи диагностики технического состояния подогревателя.

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки

Теоретическая значимость диссертации заключается в обосновании применения матричного подхода к моделированию паровой турбины и регенеративного подогревателя, что позволяет выполнить постановку и решение прямой задачи моделирования и обратной задачи диагностики технического состояния указанного оборудования. Предложены математические модели изменения состояния проточной части паровой турбины и регенеративного подогревателя, разработанные на основе проведенных исследований. Изложены результаты обработки результатов экспериментальных исследований паровой турбины и регенеративного подогревателя, которые использовались для параметрической идентификации соответствующих математических моделей.

Практическая значимость состоит в реализации предложенных математических моделей изменения состояния проточной части паровой турбины и регенеративного подогревателя, а также алгоритмов решения обратной задачи диагностики технического состояния указанного оборудования в виде программных модулей. Разработанные программные модули объединены в программном комплексе, предназначенном для решения прикладных задач в условиях эксплуатации действующего оборудования паротурбинных установок, в частности, К-300-240 ЛМЗ Костромской ГРЭС и Т-100/120-130 УТЗ ТЭЦ ВАЗа.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации.

Полученные в ходе диссертационного исследования результаты, в частности математические модели изменения состояния проточной части паровой турбины и регенеративного подогревателя, алгоритмы решения обратной задачи диагностики технического состояния указанного оборудования, рекомендуется использовать в: проектных организациях, занимающихся вопросами совершенствования

эксплуатации основного и вспомогательного энергетического оборудования; компаниях из области энергомашиностроения, занимающихся инжинирингом, производством, монтажом, обслуживанием и модернизацией энергетического оборудования; компаниях из сферы цифровых технологий, занимающихся разработкой и внедрением программного обеспечения по мониторингу и диагностике технического состояния энергетического оборудования и автоматизации технологических процессов; сервисных компаниях, занимающихся вопросами наладки, ремонта и технического обслуживания энергетического оборудования; энергетических компаниях, связанных с производством электрической и тепловой энергии.

Соответствие диссертации научной специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» в части направлений исследований:

- по пункту 1 «Разработка ... методов расчета ... параметров ... энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах ... и их основного и вспомогательного оборудования»;
- по пункту 2 «Математическое моделирование, численные ... исследования ... рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках ..., их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии»;
- по пункту 3 «Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых ... способов ... повышения надежности и ресурса элементов энергетических систем, комплексов и входящих в них энергетических установок»;
- по пункту 4 «Разработка ... методов, алгоритмов ... диагностики ... основного и вспомогательного оборудования энергетических систем ... и входящих в них энергетических установок».

Замечания и вопросы по содержанию диссертации.

1. Каким образом были выбраны параметры зависимости (2.3) для расчета относительного внутреннего КПД цилиндров высокого, среднего и низкого давлений турбины?

2. Системы уравнений (2.4) и (2.5) в диссертации содержат второе уравнение, в скобках которого приводится выражение для индекса ($j=J$), а самого индекса (j) в этих системах нет. Зачем приводится указанное выражение в круглых скобках? Каким образом выбирается в формуле Стодола-Флюгеля (2.4) расход пара при расчетном режиме, который отмечен индексом «0» в указанной формуле?

3. В тексте диссертации на стр. 84 говорится, что при моделировании теплообмена в собственно подогревателе считается, что степень сухости пара на входе равна единице ($x = 1$). Как оценивается вычислительная погрешность, обусловленная этим модельным допущением?

4. При диагностировании состояния подогревателей высокого давления оценивается отклонение расхода питательной воды от номинального значения через охладитель пара, собственно подогреватель и охладитель дренажа. Каким образом определяются указанные номинальные значения этих параметров при переменных режимах работы регенеративной установки?

5. В тексте диссертации на рисунках 2.16 (стр. 85) и 3.9 (стр. 124) показаны схемы потоков в одном регенеративном подогревателе высокого давления. Очевидно, что для моделирования реальных схем, которые включают в себя три и более регенеративных подогревателей, необходимо рассматривать более сложные схемы. Возможно ли использование предложенного подхода к диагностике каскада из трех и более регенеративных подогревателей?

Высказанные замечания не меняют общей положительной оценки основных положений диссертации.

Заключение по работе.

Диссертация Бубнова Кирилла Николаевича на тему «Совершенствование методов диагностики оборудования паротурбинных установок ТЭС на основе математического моделирования», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» (технические науки), является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения по обеспечению надежной работы и экономичной эксплуатации основного и вспомогательного энергетического оборудования ТЭС, основанные на разработанных и реализованных в виде программ для ЭВМ алгоритмах диагностики технического состояния паровой турбины и вспомогательного теплообменного оборудования паротурбинной установки, имеющие существенное значение для устойчивого развития топливно-энергетического комплекса страны и импортозамещения в энергетической и других отраслях отечественной промышленности.

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» (технические науки). Результаты диссертационного исследования апробированы на научно-технических конференциях и опубликованы в журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ.

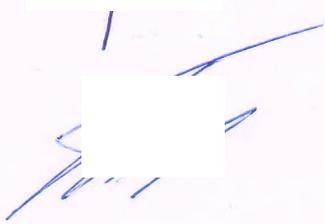
Диссертация «Совершенствование методов диагностики оборудования паротурбинных установок ТЭС на основе математического моделирования» соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки РФ, установленным в п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в актуальной редакции), а ее автор, Кирилл Николаевич Бубнов, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы» (технические науки).

Отзыв подготовлен в лаборатории поверхностных теплообменных аппаратов АЭС, ТЭС, промышленных энергоустановок и систем теплоснабжения отделения теплообменного оборудования и одобрен по результатам обсуждения материалов диссертации на расширенном заседании научно-технического совета отделения теплообменного и схемного оборудования ТЭС и АЭС ОАО «НПО «ЦКТИ» 31.01.2025, протокол № 1.

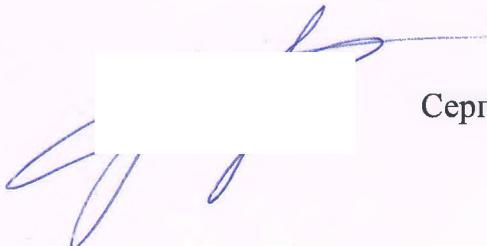
Председатель НТС, заместитель
генерального директора по научной
работе – заведующий отделением
теплообменного и схемного
оборудования ТЭС и АЭС, д.т.н.


Сухоруков
Юрий Германович

Заведующий отделом
теплообменного оборудования, к.т.н.


Егоров
Павел Викторович

Заведующий лабораторией
поверхностных теплообменных
аппаратов АЭС, ТЭС,
промышленных энергоустановок и
систем теплоснабжения, к.т.н.


Есин
Сергей Борисович

31.01.2025

Сведения о ведущей организации:

Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова», (ОАО «НПО ЦКТИ»)

Адрес: 191167, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 3/6

Телефон, факс: +7(812) 578-89-47, +7(812) 717-43-00

Адрес электронной почты: aspirantura@ckti.ru

Веб-сайт: <https://ckti.ru>