



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ  
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

К. Маркса пр., 20, г. Новосибирск, 630073  
Телетайп: 133432KADR RU  
Телефон: (383) 346-50-01, факс: (383) 346-02-09,  
E-mail: rector@nstu.ru,  
http://www.nstu.ru  
ОКПО 02068953, ОГРН 1025401485010  
ИНН/КПП 5404105174/540401001

от 18.08.2025 № 2562 / ТЭС

Отзыв ведущей организации

Председателю совета по защите  
диссертаций на соискание ученой  
степени кандидата наук, на соискание  
ученой степени доктора наук 24.1.118.01,  
созданного на базе федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Институт систем  
энергетики им. Л.А. Мелентьева  
Сибирского отделения Российской  
академии наук, академику РАН, д.т.н.,  
профессору Стенникову В.А.  
664033, Россия, г. Иркутск, ул.  
Лермонтова, д. 130

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
и инновациям



ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный  
технический университет»

К.Т.Н.

Артур Исаакович Отто  
«18» августа 2025 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» на диссертационную работу Забуги Федора Викторовича «Использование методов математического моделирования и оптимизации для оценки эффективности комплексной модернизации технологической схемы действующего энергоблока», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

#### 1. Актуальность темы выполненной работы

Тепловая генерация на органическом топливе, и в особенности на угле, сохраняет роль системообразующей основы электроэнергетики страны. На долю тепловых электрических станций (ТЭС) приходится свыше 66% установленной мощности ЕЭС России и более 60% выработки электроэнергии, причем угольные теплоэнергетические установки

обеспечивают свыше трети всего объема генерации. Аналогичные тенденции доминирования ТЭС, особенно угольных, наблюдаются и в глобальном масштабе, что подчеркивает долгосрочную значимость данного сектора. Ключевой проблемой в электрогенерации России является критический физический и моральный износ значительной части парка оборудования. Многие угольные энергоблоки, введенные в эксплуатацию еще в середине XX века и продолжающие нести существенную нагрузку, характеризуются энергетическими показателями (КПД, удельный расход топлива), значительно отстающими от современных требований и технологических возможностей. При этом темпы обновления генерирующих фондов остаются крайне низкими (чистый прирост мощностей в 2021 г. составил 0,8 ГВт), что делает невозможным их быструю замену на новые высокоэффективные установки.

Таким образом, в условиях неизбежного сохранения доминирующей роли существующих ТЭС на органическом топливе в среднесрочной и долгосрочной перспективе, основной задачей становится максимальное повышение их эффективности. В этой связи применение современных методов математического моделирования и оптимизации представляется научно обоснованным и высокопотенциальным решением. Традиционные эмпирические подходы к модернизации и наладке устаревших теплоэнергетических установок (ТЭУ) зачастую не позволяют выявить и реализовать глубинные резервы экономичности, заложенные в их конструкциях, но не использованные из-за ограниченности инструментов проектирования прошлых лет. Математическое моделирование позволяет провести детальный анализ их работы, выявить «узкие места», а методы оптимизации – найти наилучшие режимные параметры и обосновать наиболее эффективные варианты модернизации технологических схем до их дорогостоящей физической реализации.

Исследование в диссертационной работе Ф.В. Забуги, направленное на разработку и применение современных методов математического моделирования и оптимизации для повышения эффективности действующих ТЭУ ТЭС, несомненно обладает научной и практической актуальностью, отвечает на стратегическую потребность энергетического комплекса в повышении экономичности и как следствие экологичности эксплуатации критически важного, но устаревшего парка энергетического оборудования.

## **2. Цель работы**

Основной целью работы является разработка методического подхода к повышению эффективности действующих энергоустановок путем модернизации их технологических схем, основанного на использовании

детализированной математической модели, настроенной по результатам замеров текущих режимных параметров и пригодной для оптимизации как этих параметров, так и самой схемы.

### **3. Теоретическая и практическая значимость результатов работы**

Результаты данной работы вносят вклад в теорию идентификации и оптимизации энергетических установок и одновременно предлагает реальные, экономически привлекательные и апробированные решения для повышения эффективности работы оборудования действующих ТЭС России.

Теоретическая значимость представленной работы заключается в существенном развитии методического аппарата для оценки эффективности модернизации действующего энергетического оборудования ТЭС. Автором предложен новый комплексный подход, интегрирующий методы идентификации и оптимизации. Важнейшим методическим достижением является разработанный автором критерий оценки эффективности модернизации: прямое сравнение значений оптимизированной целевой функции для базовой и модернизированной схем в идентичных режимах работы. Этот подход преодолевает ограничения традиционных сравнительных методов, обеспечивая объективное, количественно обоснованное определение реального энергетического эффекта от предлагаемых изменений до их дорогостоящей реализации. Данная методология формирует новый стандарт обоснования инвестиций в модернизацию устаревших ТЭУ.

С точки зрения практической значимости работа напрямую решает острую отраслевую проблему – повышение эффективности эксплуатации действующих, зачастую морально устаревших, энергоблоков ТЭС через целенаправленную модернизацию их технологических схем. Предложенные автором конкретные, технически реализуемые и экономически обоснованные решения модернизации были не просто разработаны, но и получили положительную оценку о возможности внедрения на реальном энергообъекте (ТЭЦ-10 ООО «Байкальская Энергетическая Компания»).

### **4. Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Достоверность вынесенных на защиту результатов исследования обеспечена:

1. Применением современных, научно признанных методов математического моделирования и оптимизации энергетических установок, обеспечивающих адекватное описание их функционирования и поиск оптимальных решений.

2. Использованием математических моделей ключевых элементов энергоустановок, фундаментально основанных на базовых законах термодинамики и общепринятых, верифицированных уравнениях процессов тепломассопереноса, а также на достоверных данных о теплофизических свойствах рабочих тел и теплоносителей, что гарантирует физическую корректность моделей.

3. Обеспечением высокой точности исходных данных за счет проведения натурных замеров режимных параметров поверенными средствами измерений, что лежит в основе корректной идентификации и верификации моделей.

### **5. Содержание выполненной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 122 наименований и пяти приложений на 27 страницах. Материал диссертации изложен на 134 страницах машинописного текста и включает 10 рисунков и 26 таблицы.

**Во введении** представлена актуальность темы исследования; определена цель и научные задачи исследования; приведены основные научные результаты, выносимые на защиту; сформирована научная новизна исследований и проанализирована их практическая значимость; отражены уровень апробации и личный вклад соискателя в решении научных задач; представлены структура и объем диссертационной работы, а также количество публикаций.

**В первой главе** проведен анализ отечественных и зарубежных работ, подтверждающий, что математическое моделирование и оптимизация – ключевые инструменты для исследования сложных систем ТЭС. Выделены актуальные проблемы: значительные тепловые потери в конденсационных установках (из-за дополнительных потоков) и высокое энергопотребление на собственные нужды (особенно из-за дросселирования).

**Вторая глава** посвящена описанию методического подхода для оценки эффективности модернизаций действующих теплоэнергетических установок, основанный на настроенной математической модели установки. Подход систематизирует поиск решений, позволяет точно и оперативно оценивать их эффективность и включает три стадии реализации:

1. детальный инженерный анализ технологической схемы ТЭУ с выявлением проблемных зон;

2. разработку и идентификацию математической модели энергоустановки, настраиваемой по результатам замеров режимных параметров в контрольных точках;

3. проведение оптимизационных расчётов для базовой и модернизированной схем с последующим сравнением целевых показателей (например, удельного расхода топлива) для оценки эффективности предлагаемых решений.

Описана апробация методики на энергоблоке №5 ТЭЦ-10 ООО «БЭК» с турбиной К-150-130, для которого была успешно настроена по данным замеров в трёх режимах работы созданная модель из 121 элемента и 198 связей. Особое внимание уделено возможности оценки модернизаций, включая введение новых элементов (насосов, теплообменников) и учёт их влияния на работу всей установки.

Разработанный автором подход позволяет минимизировать затраты на натурные испытания, предоставляя точный инструмент для обоснования технических решений по повышению эффективности действующих энергоустановок.

**В третьей главе** представлено практическое применение разработанного методического подхода на примере модернизации энергоблока №5 ТЭЦ-10 ООО «БЭК». Показано, что перенаправление потоков дренажей регенерации низкого давления (эжекторов уплотнений, основных эжекторов и прогревов БРОУ) из конденсатора в подогреватель ПНД-1 позволило снизить удельный расход топлива. При оптимизации схемы основного конденсата за счёт введения дополнительного насоса уплотнений ПЭН сокращен расход электроэнергии на собственные нужды, повышен КПД энергоблока и снижен удельный расход топлива. Результаты подтверждают эффективность методики для обоснования модернизаций, обеспечивающих значительную экономию топлива и средств при минимальных сроках окупаемости.

**В заключении** представлены основные результаты и выводы диссертационной работы Забуги Ф.В.

**Приложения** диссертационной работы включают: описание трехэтапной методики идентификации параметров математической модели теплоэнергетической установки; описание математических моделей элементов технологической схемы исследуемого в работе энергоблока; исходные данные и результаты выполненной идентификации параметров математической модели исследуемого энергоблока; перечень капиталовложений в необходимое оборудование для проведения модернизации; справку о возможности внедрения предложенной автором модернизации тепловой схемы регенерации низкого давления энергоблока №5 ООО «БЭК».

Автореферат диссертационной работы изложен на 26 страницах и состоит из: 4 рисунков; 3 таблиц; списка опубликованных работ.

Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертационной работы. В автореферате в последовательном порядке раскрыты цель, задачи и методы исследования, представлены основные результаты работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

#### **6. Научная новизна результатов работы состоит в следующем:**

- Предложен оригинальный методический подход для оценки эффективности модернизации ТЭУ, интегрирующий методы математического моделирования и схемно-параметрической оптимизации.
- Создана и верифицирована детализированная математическая модель энергоблока, включающая точные описания паровой турбины К-150-130 и котлоагрегатов ПК-24, настроенная по данным натурных замеров и адаптированная для оптимизационных расчетов методом ступенчатой оптимизации.
- Проведен комплекс расчетов, подтвердивших работоспособность методики и позволивших повысить КПД энергоблока за счет малозатратных схемных и параметрических решений, разработанных автором.

#### **7. Соответствие содержания работы паспорту специальности**

Разработанные в диссертационной работе методический подход к оценке эффективности модернизации технологической схемы действующей энергоустановки, математическая модель элементов технологической схемы исследуемого дубль-блока на базе турбоагрегата К-150-130, схемные решения и рекомендации по модернизации теплоэнергетических установок ТЭС соответствует следующим пунктам паспорта специальности ВАК 2.4.5. Энергетические системы и комплексы:

- пункту 1 «Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования»;

- пункту 2 «Математическое моделирование, численные и натуральные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии»;

- пункту 3 «Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий и оборудования для

производства электрической и тепловой энергии, использования органического и альтернативных топлив, и возобновляемых видов энергии, водоподготовки и водно-химических режимов, способов снижения негативного воздействия на окружающую среду, повышения надежности и ресурса элементов энергетических систем, комплексов и входящих в них энергетических установок».

#### **8. Полнота опубликованных результатов и апробация работы**

Основные результаты диссертации были представлены на 5 конференциях всероссийского и международного уровней. Также результаты диссертации опубликованы в 8 научных работах, в том числе 3 работы в рецензируемых журналах из перечня ВАК по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы из категорий К1 и К2; 1 публикация в сборниках конференций, индексируемых в международной базе данных Scopus.

#### **9. Личный вклад**

Личный вклад автора заключается в разработке методического подхода к оценке эффективности модернизации теплоэнергетических установок, включающего методы идентификации математических моделей и оптимизацию режимных параметров, а также созданию и верификации математической модели пылеугольного дубль-блока с учетом его текущего технического состояния, проведении оптимизационных расчетов и выявлении эффективных способов модернизации, оформленных в виде технических решений для ТЭЦ-10 ООО «БЭК».

#### **10. Вопросы и замечания по работе**

По диссертации имеются следующие вопросы и замечания.

1. Автор решает задачу устранения грубых («плохих») погрешностей измерений штатных приборов ТЭУ. Однако неясно, что на практике стало причиной таких измерений при высокой точности штатных измерительных приборов, которые (см. табл. Приложения В3) отличаются от выбранных автором для математической модели.

2. В первой главе диссертационной работы автором был обозначен перечень общеизвестных эффективных решений по модернизации технологической схемы ТЭУ: ввод дополнительного перегрева, отработавшего в части высокого давления турбины пара, повышение входных параметров пара перед турбоустановкой, повышение эффективности работы ее проточной части и увеличение единичной мощности турбоагрегатов, которые способны повысить экономичность

работы паротурбинных блоков на 4–7%. Автор не обозначил сравнительную стоимость этих решений по отношению к предлагаемым им в диссертационном исследовании малозатратным решениям по снижению потерь тепла в конденсационных установках.

3. В качестве эффективных решений по снижению удельного расхода электроэнергии на собственные нужды в размере до 6% (до 9 МВт) для паротурбинных блоков 150 МВт автором были обозначены такие меры, как: альтернативные дросселированию способы регулирования расходов рабочих тел и теплоносителей, использование гидромурфт, позволяющих осуществлять регулировку скорости вращения оборудования собственных нужд, применение паротурбинных приводов питательных насосов, использование электрического регулирования на основе двухзвенных преобразователей с регулируемой выходной частотой вращения, модернизация тягодутьевых машин и дробильных устройств топливоподачи. Из текста диссертации неясно, каким образом эти решения, в частности замена электроприводов питательных насосов на турбоприводы, могли бы быть учтены при комплексной модернизации технологической схемы ТЭУ.

4. Автором исследован вариант охлаждения конденсаторного блока посредством проточной воды с исходной температурой в зимний период времени 6 °С и 15°С в летний. В какой мере предложенные им решения будут применимы при работе с башенными градирнями, не обеспечивающими такой низкий уровень температур?

5. Анализ показателей работы ТЭС за 2023 год показал (см.табл. 3.11 – ТЭП дубль-блока №5 за 2023 год), что при годовом расходе условного топлива 300637,5 т у.т. для выработки  $862940 \cdot 10^3$  кВт·ч электроэнергии возможно его значение – 348 г у.т./кВт·ч. В таблицах 3.4-3.7 этот показатель составляет при учете энергосберегающих мероприятий 360...370 г у.т /кВт·ч. В чем причина такого неблагоприятного расхождения?

6. Замеры режимных параметров исследуемого энергоблока для проведения ИПММ были выполнены в процессе его эксплуатации для трех стабильных режимов работы с активной нагрузкой ( $N_{э}$ ): 108, 132, 140 МВт (стр. 48 диссертации), однако экономический эффект от предложенных автором мероприятий оценивается на режимах работы с активной нагрузкой 140...150 МВт (см. табл. 3.14). В какой мере это могло отразиться на точности расчетов?

7. На 2-м этапе идентификации согласно УМ-ИПММ была осуществлена проверка ММ энергоблока №5 на предмет присутствия неточностей моделирования. В состав оптимизируемых параметров был включен вектор настраиваемых коэффициентов (далее – НК), включающий девять один коэффициент модели (табл. 2.4 – Допустимые границы диапазонов значений

НК ММ исследуемого энергоблока). В чём выражается физическая сущность термина «неточность моделирования»?

8. Низкозатратные мероприятия, предложенные автором для конденсатного блока энергоустановки (дренажи эжекторов заведены в ПНД-1, прогревы БРОУ-2 заведены в ПНД-1, дренажи эжекторов и прогревы БРОУ-2 заведены в ПНД-1), приводят к повышению КПД (нетто) только на сотые доли процента (см. табл. 3.4-3.7). Какова доверительная вероятность этих значений?

9. Как рассчитывался экономический эффект  $E_n$  и срок окупаемости  $T_o$  затрат, приведенные в таблице 3.16? Есть ли рекомендуемые диапазоны для численных значения экономического эффекта  $E_n$  при оценке разных видов модернизации?

Указанные вопросы и замечания не снижают положительной оценки диссертационной работы.

## 11. Заключение

Диссертационная работа Забуги Ф.В. «Использование методов математического моделирования и оптимизации для оценки эффективности комплексной модернизации технологической схемы действующего энергоблока» по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы представляет завершённую научно-квалификационную работу, в которой решается актуальная задача повышения эффективности работы действующих энергетических установок за счёт малозатратных способов модернизации их технологических схем и оборудования. Результаты исследования диссертационной работы могут быть использованы энергетическими предприятиями при модернизации действующих ТЭС, включая оптимизацию технологических схем и снижение удельного расхода топлива, а также научными и проектными организациями при разработке цифровых моделей энергоустановок и планировании модернизаций с применением методов математического моделирования и ступенчатой оптимизации. Содержание диссертационной работы соответствует теме исследования и пунктам 1, 2, 3 паспорта специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Работа выполнена на высоком научном уровне с соблюдением требований академического стиля. Материал изложен логично и систематизирован, с четкой структурой. Автор демонстрирует строгое следование принципам научной этики, что подтверждается корректным цитированием и достаточно полным библиографическим аппаратом.

Диссертационная работа, полностью удовлетворяет критериям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного

Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Забуга Федор Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

Отзыв на диссертационную работу и автореферат обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры «Тепловые электрические станции» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» «30» июня 2025 г. (Протокол № 7).

Профессор кафедры «Тепловые электрические станции»,  
доктор технических наук, доцент

  
Боруш  
Олеся Владимировна

Профессор кафедры «Тепловые электрические станции»,  
доктор технических наук, доцент

  
Елистратов  
Сергей Львович

Подписи Боруш О.В. и Елистратова С.Л. заверяю  
Начальник отдела кадров НГТУ

  
Пустовалова  
Любга Константиновна

**Сведения о ведущей организации:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20

Телефон: +7 (383)346-08-43

Веб-сайт: <https://www.nstu.ru/>

E-mail: [rector@nstu.ru](mailto:rector@nstu.ru)