

На правах рукописи



ЗИНОВЬЕВА Анастасия Сергеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА
ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК ТЭС**

Специальность: 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иваново 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Ледуховский Григорий Васильевич**

Официальные оппоненты:

Зиганшина Светлана Камиловна, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», профессор кафедры «Тепловые электрические станции»;

Дудолин Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции».

Ведущая организация:

Публичное акционерное общество энергетики и электрификации «Мосэнерго», г. Москва.

Защита состоится «26» декабря 2025 г. в 11:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.303.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина.

Текст диссертации размещен: ispu.ru/sites/default/files/2025-10/Disser_Zinovieva_A.S..pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.303.01

Козлова Мария Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При определении фактических значений технико-экономических показателей (ТЭП) работы энергетического оборудования тепловых электрических станций (ТЭС) одним из обязательных этапов является сведение материальных и энергетических балансов. Требования относительно необходимости проведения таких расчетов содержатся в отраслевых руководящих документах, регламентирующих составление отчетности о показателях тепловой экономичности ТЭС. Однако методы сведения балансов, рекомендуемые этими нормативными документами, не позволяют учитывать степень достоверности определения отдельных параметров и обоснованно находить компромисс между невязкой балансов, обусловленной несовершенством метрологических характеристик приборов учета, и величиной вносимых в первичные данные корректировок. Кроме того, материальные, энергетические (а также топливные и электрические) балансы для сложной энергетической системы оказываются связанными друг с другом как по системе в целом, так и по отдельным подсистемам, что существенно осложняет решаемую задачу.

Некорректность исходной информации при сведении баланса может быть обусловлена не только метрологическими характеристиками приборов учета, но также их неисправностью. Кроме того, зачастую в практике ряд важных с точки зрения расчета ТЭП параметров оказывается по разным причинам не обеспеченным приборным учетом. Такие показатели определяются косвенно с использованием комплекса измеряемых параметров. Очевидно, степень достоверности определения таких параметров напрямую зависит и от методики, использованной при сведении балансов.

Газотурбинные (ГТУ) и парогазовые (ПГУ) установки ТЭС как объекты сведения балансов имеют существенные особенности в сравнении с оборудованием традиционного паросилового цикла. Так, в ГТУ материальный и энергетический балансы затрагивают разные теплоносители (воздух, топливо, дымовые газы), а также оборудование вспомогательных технологических систем. Кроме того, в утилизационных ПГУ показатели работы ГТУ определяют и показатели работы котла-утилизатора (КУ), работа которого, в свою очередь, связана с работой паровой турбины (ПТ). Это означает, что в ПГУ материальный и энергетический балансы по ГТУ, КУ и ПТ должны быть связанными между собой.

Разработка обоснованных методик сведения материальных и энергетических балансов для ГТУ и ПГУ при некорректно заданной исходной информации является актуальной задачей как в научном, так и в практическом отношении.

Применительно к ГТУ и ПГУ отсутствуют также обоснованные методики расчета таких важнейших с точки зрения организации эксплуатации и ремонта оборудования ТЭП как составляющие резерва тепловой экономичности (РТЭ) – экономии или перерасхода топлива в условном исчислении из-за отклонения фактических значений от-

дельных параметров от их номинальных значений. При этом известно, что баланс РТЭ (соответствие суммы РТЭ общему РТЭ по энергоблоку или ТЭС) является косвенным методом контроля обоснованности расчета всех фактических и номинальных значений ТЭП энергетического оборудования, в том числе и методов сведения материального и энергетического балансов как подготовительного этапа расчета.

Актуальность темы работы подтверждается её соответствием приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации «Высокоэффективная и ресурсосберегающая энергетика» в рамках критической технологии «Технологии создания высокоэффективных систем генерации, распределения и хранения энергии (в том числе атомной)» согласно Указу Президента Российской Федерации №529 от 18 июня 2024 г., а также выполнением основных этапов работы в рамках НИОКР и хозяйственных договоров с предприятиями энергетической отрасли.

Степень разработанности темы работы. Вопросы сведения балансов при расчете фактических ТЭП оборудования ТЭС затронуты как в нормативных документах энергетической отрасли, так и в опубликованных результатах исследований ряда авторов. При этом основной нормативный документ, регламентирующий процедуру сведения материального баланса по ТЭС – Руководящие указания по ведению месячного пароводяного баланса на тепловых электростанциях – разрабатывался в середине прошлого века, касается только ТЭС традиционного паросилового цикла и устанавливает упрощенный способ сведения баланса. В предшествующих исследованиях, выполненных в ИГЭУ (Ледуховский Г.В., Зимин А.П., Борисов А.А., Горшенин С.Д. и др.) показаны недостатки нормативного подхода и недопустимые, с точки зрения целей контроля фактических ТЭП и составляющих резерва тепловой экономичности оборудования ТЭС, последствия его применения в отдельных случаях. В работах ряда авторов (Овчинников Ю.В., Ноздренко Г.В., Щинников П.А., Боруш О.В., Елистратов С.Л., Сафронов А.В., Аракелян Э.К., Сабанин В.Р., Репин А.И., Бахметова Н.А., Сажин С.Г., Луконин В.П. и др.) предлагались методы корректировки измеренных значений параметров по условиям согласования материальных, энергетических, эксергетических балансов в системе, а также с привлечением замещающих моделей (термодинамических, статистических, нейросетевых). Эти исследования, в основном, направлены на решение задачи повышения достоверности данных в АСУ ТП электростанций. Методы решения обратных задач корректировки исходных данных по известному результату активно разрабатываются с 1970-х годов как в России (Тихонов А.Н., Арсенин В.Я., Леонов А.С., Ягола А.Г., Морозов В.А., Воскобойников Ю.Е., Литасов В.А., Черненко Л.В., Лэ В.Х. и др.), так и за рубежом (Swartz C., Pignatiello J.J., Runger G.C., Narasimhan S., Jordache C., Montgomery D.C., Spindler A., Vanrolleghem P.A., Mahmoud M.A., Maravelakis P.E., Lucas, J.M., Crosier R.B. и др.) и нашли применение для различных объектов: от технических устройств и систем

до социальных и экономических процессов. Эти исследования, в основном, базируются на методе регуляризации Тихонова при решении некорректных задач. В рамках диссертационного исследования Зими́на А.П. (ИГЭУ) была предложена методика сведения материальных и энергетических балансов в тепловых схемах ТЭС, основанная на матричной модели материальных потоков в энергетических системах и подходе к решению некорректных задач на основе регуляризации Тихонова. Продемонстрирована эффективность использования предложенной методики при обработке результатов испытаний паротурбинных установок и расчете фактических и номинальных значений ТЭП оборудования паротурбиной ТЭС и водопаровой части парогазовой ТЭС. Балансы ГТУ в рамках данной методики не рассматривались. В отношении методик расчета РТЭ ГТУ и ПГУ в системе нормативных документов энергетической отрасли имеется только методика, разработанная в ПАО «Интер РАО» и применяемая для электростанций данной энергетической компании. В нормативных документах федерального уровня требования к порядку расчета РТЭ ГТУ и ПГУ не установлены.

Целью работы является повышение эффективности эксплуатации парогазовых установок ТЭС за счет разработки и внедрения методик сведения материального и энергетического балансов по результатам измерения контролируемых параметров ГТУ и расчета составляющих резерва тепловой экономичности оборудования парогазовых установок утилизационного типа.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Разработка и программная реализация методики сведения материальных и энергетических балансов ГТУ по результатам измерения контролируемых параметров по воздушному, топливному, газовому трактам и турбогенератору в рамках концепции регуляризации Тихонова при решении некорректных задач.

2. Разработка методики расчета составляющих резерва тепловой экономичности оборудования ПГУ утилизационного типа.

3. Синтез методики совместного сведения материальных и энергетических балансов по ПГУ в целом из разработанной методики сведения балансов ГТУ и известной методики сведения балансов в пароводяном тракте ТЭС.

4. Реализация разработанных методик сведения материальных и энергетических балансов, расчета составляющих резерва тепловой экономичности оборудования в составе комплексной системы мониторинга технико-экономических показателей и оптимизации загрузки оборудования парогазовой ТЭС.

5. Проведение расчетно-экспериментальных исследований для оценки эффективности внедрения разработанных методик расчета в практику определения показателей тепловой экономичности ПГУ утилизационного типа.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности *в части направления исследований*: пункту 1 «Разработка ... методов расчета, алго-

ритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы ... энергетических установок на органическом ... топлив(е) ... в целом и их основного и вспомогательного оборудования»; пункту 3 «Разработка, исследование, совершенствование действующих ... технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии...»; пункту 4 «Разработка научных подходов, методов, алгоритмов ... контроля и диагностики ... основного и вспомогательного оборудования ... станций ... и входящих в них энергетических установок».

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. В рамках подхода регуляризации Тихонова к решению некорректных задач разработана методика совместного сведения материального и энергетического балансов ГТУ по данным технического учета, позволяющая обоснованно корректировать результаты измерения контролируемых параметров исходя из условия сведения балансов по аддитивным параметрам с учетом метрологических характеристик используемых средств измерения. Получены аналитические и численные решения задачи при её скалярной и векторной постановках.

2. Разработана методика совместного сведения материальных и энергетических балансов по ПГУ в целом, базирующаяся на разработанной методике сведения балансов ГТУ и известной методике сведения балансов в пароводяном тракте ТЭС. Получены количественные характеристики влияния используемой методики сведения балансов на показатели тепловой экономичности оборудования ПГУ утилизационного типа.

3. Разработана усовершенствованная методика расчета составляющих резерва тепловой экономичности оборудования ПГУ утилизационного типа, отличающаяся от известной методики корректным учетом теплосодержания топливного газа на входе в камеры сгорания ГТУ, учетом особенностей тепловых схем ПГУ с суховоздушными градирнями для охлаждения сетевой воды, а также расширенным перечнем определяемых составляющих резерва тепловой экономичности для повышения объективности оценки технического состояния оборудования и уровня его эксплуатации.

Теоретическая значимость работы состоит: *в расширении* области применения известной методики сведения материальных и энергетических балансов ТЭС, основанной на подходе регуляризации Тихонова при решении некорректных задач, на энергоблоки парогазового цикла за счет формулировки и решения на единой методологической основе задачи сведения балансов ГТУ; *в получении* новых результатов, характеризующих влияние используемой методики сведения балансов ГТУ на показатели тепловой экономичности ГТУ, КУ, ПТ и ПГУ в целом; *в повышении* объективности оценки технического состояния оборудования ПГУ утилизационного типа и уровня его эксплуатации за счет разработки и внедрения усовершенствованной методики расчета составляющих резерва тепловой экономичности.

Практическая значимость результатов заключается в следующем:

1. Разработанная методика сведения балансов ГТУ реализована в виде программно-го модуля «Сведение материального и энергетического баланса газотурбинной установки по данным АСУТП» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023687086 от 11.12.2023 г.).

2. Разработанная методика расчета составляющих резерва тепловой экономичности оборудования апробирована при оценке показателей тепловой экономичности ПГУ утилизационного типа, находящихся в эксплуатации. Выявлены недостатки нормативных документов энергетической отрасли в части расчета составляющих резерва тепловой экономичности оборудования энергетических установок парогазового цикла.

3. Разработанные программный модуль и методика расчета составляющих резерва тепловой экономичности ПГУ интегрированы в комплексную систему мониторинга технико-экономических показателей и оптимизации загрузки оборудования парогазовой ТЭС с энергоблоками ПГУ-116, ПГУ-120, что обеспечило повышение объективности оценки технического состояния и уровня эксплуатации оборудования.

4. Разработанная методика сведения балансов по данным эксплуатационного контроля ПГУ положена в основу программного комплекса «Программа для реализации алгоритма сведения материального и теплового баланса основного оборудования и групп оборудования филиала «Уренгойская ГРЭС» АО «Интер РАО – Электрогенерация» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023687983 от 19.12.2023 г.), внедренного в рамках НИОКР в практику расчета ТЭП на Уренгойской ГРЭС.

Методология и методы исследований. Для получения результатов работы использованы методы решения некорректных задач в рамках подхода регуляризации Тихонова, статистического программирования, матричного моделирования, обработки экспериментальных данных, расчета показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования обоснована применением апробированных методов математического моделирования и анализа тепловой экономичности энергетических установок; согласованностью основных положений диссертации с опубликованными данными; апробацией разработанных методик расчета в условиях промышленной эксплуатации ПГУ; проверкой разработанных методик применительно к различным промышленным объектам.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика сведения материальных и энергетических балансов ГТУ по результатам измерения контролируемых параметров по воздушному, топливному, газовому трактам и турбогенератору, разработанная в рамках подхода регуляризации Тихонова к решению некорректных задач.

2. Усовершенствованная методика расчета составляющих резерва тепловой эконо-

мичности оборудования ПГУ утилизационного типа.

3. Методика совместного сведения материальных и энергетических балансов по ПГУ в целом, базирующаяся на разработанной методике сведения балансов ГТУ и известной методике сведения балансов в пароводяном тракте ТЭС.

4. Результаты анализа влияния используемой методики сведения балансов на показатели тепловой экономичности оборудования ПГУ утилизационного типа.

5. Результаты расчетно-экспериментальных исследований по оценке эффективности внедрения разработанных методик сведения материальных и энергетических балансов, расчета составляющих резерва тепловой экономичности оборудования в практику определения показателей тепловой экономичности ряда энергоблоков ПГУ утилизационного типа.

Реализация результатов работы:

1. Разработанная методика сведения балансов ГТУ и реализующий её программный модуль «Сведение материального и энергетического баланса газотурбинной установки по данным АСУТП» использованы в составе комплексной системы мониторинга технико-экономических показателей и оптимизации загрузки оборудования ТЭС «Международная» (г. Москва), что обеспечило повышение точности расчета показателей тепловой экономичности оборудования. По результатам работы обоснованы резервы тепловой экономичности ПГУ, выявлены причины их появления.

2. Разработанные методики сведения балансов ГТУ и ПГУ в целом апробированы применительно к энергоблоку ПГУ-450 в рамках выполнения НИОКР на разработку методики и алгоритма сведения теплового и материального балансов оборудования филиала «Уренгойская ГРЭС» АО «Интер РАО – Электрогенерация». Разработанное программное обеспечение внедрено в практику расчета ТЭП Уренгойской ГРЭС.

3. Разработанная методика расчета составляющих резерва тепловой экономичности в ИГЭУ включена в дополнительные профессиональные образовательные программы «Расчеты фактических, номинальных, нормативных ТЭП ТЭС с парогазовыми установками» и «Повышение квалификации эксплуатационного персонала теплового цеха ПГУ» в рамках повышения квалификации специалистов электростанций и генерирующих компаний.

Реализация результатов работы подтверждена тремя актами внедрения.

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в разработке методики сведения материального и энергетического балансов ГТУ, её реализации в виде программы для ЭВМ; в разработке способа построения методики совместного сведения материальных и энергетических балансов по ПГУ в целом из разработанной методики сведения балансов ГТУ и известной методики сведения балансов в пароводяном тракте ТЭС, в апробации полученной методики в рамках договора на создание (передачу) научно-технической продукции применительно к ТЭС «Международная»

и в рамках НИОКР применительно к Уренгойской ГРЭС (г. Новый Уренгой); в разработке и апробации в условиях промышленной эксплуатации методики расчета составляющих резерва тепловой экономичности оборудования ПГУ; в проведении анализа влияния используемой методики сведения балансов ГТУ на показатели тепловой экономичности оборудования ПГУ утилизационного типа; в подготовке основных публикаций по тематике диссертационного исследования.

Апробация работы. Основные результаты опубликованы и обсуждались на 13 конференциях: XVII и XIX всероссийских (IX и XI международных) научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (Иваново, 2022 и 2024 гг.); II научно-технической конференции студентов и аспирантов с международным участием «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2022 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Расчет и анализ технико-экономических показателей (ТЭП) электростанций и генерирующих компаний в современных условиях. Перспективы совершенствования и оптимизации нормативно-технической документации по топливоиспользованию (НТД ТИ)» (Москва, 2022 г.); Национальных с международным участием научно-практических конференциях студентов, аспирантов, ученых и специалистов «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе» (Тюмень, 2022 и 2023 гг.); VII и VIII Международных научно-практических конференциях «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (Кемерово, 2023 и 2024 гг.); XXIX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2023 г.); XXII и XXIII Международных научно-технических конференциях «Бенардосовские чтения» (Иваново, 2023 и 2025 гг.); III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики» (Ульяновск, 2023 г.); V научно-технической конференции студентов и аспирантов с международным участием «Энергоэффективные технологии в строительстве, энергетике и жилищно-коммунальном хозяйстве» (Ульяновск, 2024 г.).

Публикации. Материалы диссертации нашли отражение в 22 опубликованных работах, в том числе в 5 статьях в ведущих рецензируемых журналах (по списку ВАК); 15 тезисах и полных текстах докладов конференций; получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка использованных источников из 169 наименований. Текст диссертации изложен на 157 стр. машинописного текста, содержит 29 рисунков, 18 таблиц и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов,

перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, внедрении её результатов, о публикациях по тематике исследования.

В первой главе проведен анализ данных по тематике исследования. Рассмотрены требования нормативных документов, регламентирующих этапы сведения материального и энергетического балансов по результатам измерения контролируемых параметров оборудования и расчета РТЭ ТЭС. Описаны существующие подходы к решению рассматриваемой задачи, показаны преимущества концепции регуляризации Тихонова в решении некорректных задач, приведены ранее полученные в приложении к оборудованию ТЭС результаты. Сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке методики совместного сведения материальных и энергетических балансов ГТУ по результатам измерения контролируемых параметров в рамках концепции регуляризации Тихонова при решении некорректных задач.

Рассматриваются материальный и энергетический балансы ГТУ:

$$B_{\text{КС}} + G_{1\text{к}} - G_{2\text{т}} = 0; \quad Q_{\text{КС}} + Q_{1\text{к}} - Q_{2\text{т}} - Q_5 - Q_{\text{эм}} - N_{\text{ГТУ}} = 0, \quad (1)$$

где $B_{\text{КС}}$, $G_{1\text{к}}$ и $G_{2\text{т}}$ – расходы соответственно топлива в камеру сгорания (КС), воздуха на входе в компрессор (КР) и продуктов сгорания на выходе из турбины (ГТ), кг/с; $Q_{\text{КС}}$, $Q_{1\text{к}}$ и $Q_{2\text{т}}$ – тепловая мощность соответственно подведенная к КС, подведенная с потоком воздуха к КР и мощность потока продуктов сгорания за ГТ, МВт; Q_5 и $Q_{\text{эм}}$ – мощность соответственно тепловых потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханических потерь ГТУ, МВт; $N_{\text{ГТУ}}$ – электрическая мощность ГТУ, МВт.

При использовании результатов измерения контролируемых при эксплуатации оборудования параметров балансы (1) в общем случае не сводятся ввиду метрологического несовершенства средств измерения либо их неисправности:

$$B_{\text{КС}}^{\text{и}} + G_{1\text{к}}^{\text{и}} - G_{2\text{т}}^{\text{и}} = \Delta G; \quad Q_{\text{КС}}^{\text{и}} + Q_{1\text{к}}^{\text{и}} - Q_{2\text{т}}^{\text{и}} - Q_5 - Q_{\text{эм}} - N_{\text{ГТУ}}^{\text{и}} = \Delta E, \quad (2)$$

где индекс «и» – результат прямого или косвенного измерения; ΔG , кг/с, и ΔE , МВт – невязки соответственно материального и энергетического балансов.

Q_5 определяется в ходе поверочного теплового расчета либо по показателям работы системы вентиляции укрытия ГТУ, $Q_{\text{эм}}$ рассчитывается по зависимости электромеханического КПД ГТУ от $N_{\text{ГТУ}}$, входящей в состав нормативных энергетических характеристик (НЭХ) ГТУ. Прочие составляющие Q_i связаны с расходами теплоносителей:

$$Q_{\text{КС}}^{\text{и}} = B_{\text{КС}}^{\text{и}}(h_{\text{топл}}^{\text{и}} + Q_{\text{н}}^{\text{п}}); \quad Q_{1\text{к}}^{\text{и}} = G_{1\text{к}}^{\text{и}} h_{1\text{к}}^{\text{и}}; \quad Q_{2\text{т}}^{\text{и}} = G_{2\text{т}}^{\text{и}} h_{2\text{т}}^{\text{и}}, \quad (3)$$

где $h_{\text{топл}}^{\text{и}}$, $h_{1\text{к}}^{\text{и}}$, $h_{2\text{т}}^{\text{и}}$ – энтальпия соответственно топлива, поступающего в КС, воздуха на входе в КР, продуктов сгорания за ГТ, определяемые по измеренным значениям параметров теплоносителей, МДж/кг; $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – низшая удельная теплота сгорания на рабочую массу топлива, поступающего в КС, МДж/кг.

Предложенные варианты скалярной и векторной постановок оптимизационной задачи сведения балансов в рамках концепции регуляризации Тихонова, её аналитические и численные решения сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Варианты постановки и решения оптимизационной задачи при сведении балансов ГТУ*

Вариант постановки / решения	Формулировка задачи, решение
Скалярная, при фиксированных значениях энтальпий теплоносителей без учета ограничений / аналитическое (вариант «С»)	$F(\mathbf{Y}, \lambda) = \mathbf{A}\mathbf{Y} - \mathbf{B} ^2 + \lambda \mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0 ^2 \Rightarrow \min,$ $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ (h_{\text{топл}}^{\text{и}} + Q_{\text{н}}^{\text{р}}) & h_{1\text{к}}^{\text{и}} & -h_{2\text{т}}^{\text{и}} & -\frac{1}{\eta_{5\text{т}}} \end{pmatrix},$ $\mathbf{Y} = (B_{\text{КС}} \quad G_{1\text{к}} \quad G_{2\text{т}} \quad N_{\text{ГТУ}})^T, \mathbf{B} = 0.$ Решение известно (Тихонов А.Н.): $\mathbf{Y} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{E})^{-1} \lambda \mathbf{Y}_0$
Векторная, при фиксированных значениях энтальпий теплоносителей, без учета ограничений / аналитическое (вариант «В-1»)	$F(\mathbf{Y}, \lambda) = \mathbf{A}\mathbf{Y} - \mathbf{B} ^2 + \lambda(\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0) ^2 \Rightarrow \min;$ $\mathbf{A}, \mathbf{Y}, \mathbf{B}$ – см. вариант «С». Решение известно (Зимин А.П.): $\mathbf{Y} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda^2 \mathbf{E})^{-1} \lambda^2 \mathbf{Y}_0$
Векторная, при фиксированных значениях энтальпий теплоносителей, с учетом ограничений / аналитическое (вариант «В-2»)	$F(\mathbf{Y}, \lambda)$ – см. вариант «В-1»; $\mathbf{A}, \mathbf{Y}, \mathbf{B}$ – см. вариант «С». $Y_i \in [Y_i^{\min}; Y_i^{\max}]$. Решение известно: метод итераций аналитических решений с контролем ограничений
Векторная, при фиксированных значениях энтальпий теплоносителей, с учетом ограничений / численное (вариант «В-3»)	$F(\mathbf{Y}, \lambda)$ – см. вариант «В-1»; $\mathbf{A}, \mathbf{Y}, \mathbf{B}$ – см. вариант «С»; Y_i – см. вариант «В-2». Решение методом статистического программирования в заданных ограничениях
Векторная, с учетом неопределенности результатов измерения теплотехнических параметров теплоносителей, без учета ограничений / аналитическое (вариант «В-4.0»)	Последовательная регуляризация в два этапа: Этап 1 – по расходам теплоносителей и $N_{\text{ГТУ}}$: $F(\mathbf{Y}, \lambda), \mathbf{A}, \mathbf{Y}, \mathbf{B}$ – см. вариант «С». Решение известно (Зимин А.П.) – см. вариант «В-1». Этап 2 – по теплотехническим параметрам теплоносителей: $F_1(\mathbf{Y}_1, \lambda_1) = \mathbf{A}_1 \mathbf{Y}_1 ^2 + \lambda_1(\mathbf{Y}_1 - \mathbf{Y}_{1,0}) ^2 \Rightarrow \min;$ $\mathbf{Y}_1 = \begin{pmatrix} (h_{\text{топл}}^{\text{и}} + Q_{\text{н}}^{\text{р}}) & h_{1\text{к}}^{\text{и}} & -h_{2\text{т}}^{\text{и}} & -\frac{1}{\eta_{5\text{т}}} \end{pmatrix},$ $\mathbf{A}_1 = (B_{\text{КС}} \quad G_{1\text{к}} \quad G_{2\text{т}} \quad N_{\text{ГТУ}}).$ Решение известно (Зимин А.П.): $\mathbf{Y}_1 = (\mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1 + \lambda_1^2 \mathbf{E})^{-1} \lambda_1^2 \mathbf{Y}_{1,0}$
Векторная, с учетом неопределенности результатов измерения теплотехнических параметров теплоносителей, с учетом ограничений / численное (вариант «В-4»)	$F(\mathbf{Y}, \lambda)$ – см. вариант «В-1»; $\mathbf{A}, \mathbf{Y}, \mathbf{B}$ – см. вариант «С»; $\mathbf{Y}_1$ – см. вариант «В-4.0»; Y_i – см. вариант «В-2». Решение методом статистического программирования в заданных ограничениях по алгоритму: 1) генерация случайным образом с учетом ограничений по Y_i вектора $\mathbf{Y}\mathbf{Y} = [\mathbf{Y} \quad \mathbf{Y}_1]$; 2) формирование матрицы $\mathbf{A}$; 3) расчет значения целевой функции F ; 4) повторение заданное число раз m пп. 1), 2), 3) с фиксацией варианта, соответствующего минимуму значения F

*** Примечание.** В таблице 1 использованы следующие обозначения: $\mathbf{Y}, \mathbf{Y}_0$ – искомое регуляризованное решение и его априорная оценка; $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ – известные операторы модели системы; λ – малый положительный параметр регуляризации; индекс «Т» – транспонирование матрицы; индекс «–1» – обращение матрицы; λ – диагональная матрица параметров регуляризации, где число параметров регуляризации совпадает с количеством входных параметров модели; $\eta_{5\text{т}}$ характеризует тепловые потери от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханические потери ГТУ и определяется согласно равенству: $Q_5 + Q_{\text{эм}} + N_{\text{ГТУ}} = N_{\text{ГТУ}}/\eta_{5\text{т}}$; $Y_i^{\min}$ и $Y_i^{\max}$ – границы доверительного интервала существования действительного значения параметра, обусловленные номинальной погрешностью исправного средства измерения.

Результаты апробации вариантов постановки и решения задачи на примере одного из режимов работы ГТУ типа GTX-100 иллюстрирует таблица 2. Приведены также ре-

зультаты расчета КПД брутто ГТУ по прямому ($\eta_{ГТУ}^{бр(пр)}$) и обратному ($\eta_{ГТУ}^{бр(обр)}$) балансам и модуль их отклонения $\Delta\eta$. Предварительно выявлено, что вариант «В-4.0» не дает преимуществ в сравнении с вариантом «В-3», поэтому здесь не приводится.

Таблица 2. Исходные данные и результаты расчетов для контрольного режима при различных вариантах постановки и решения оптимизационной задачи*

Обозначение, единица измерения	Апри- орные значе- ния Y_{0i}	Метрологические ограничения $[Y_i^{min}; Y_i^{max}]$	Регуляризированные значения Y_i				
			вариант «С» $\lambda=0,95$	вариант «В-1» $\lambda_i=1,04$	вариант «В-2» / λ_i	вариант «В-3»	вариант «В-4»
$B_{КС}$, кг/с	1,790	[1,772; 1,808]	1,810	1,805	1,807 / 0,245	1,807	1,788
$G_{1к}$, кг/с	101,46	[100,44; 102,47]	100,19	100,25	100,45 / 0,645	100,46	100,45
$G_{2т}$, кг/с	99,54	[97,05; 102,03]	100,79	100,74	100,94 / 0,564	100,91	100,92
$N_{ГТУ}$, МВт	29,23	[28,94; 29,52]	29,20	29,20	29,21 / 0,775	29,18	29,19
$h_{топл}$, МДж/кг	0,11509	[0,11279; 0,11739]	0,11509	0,11509	0,11509	0,11509	0,11584
Q_p^H , МДж/кг	50,535	50,535**	50,535	50,535	50,535	50,535	50,535
$h_{1к}$, МДж/кг	0,002692	[0,002625; 0,002759]	0,002692	0,002692	0,002692	0,002692	0,002740
$h_{2т}$, МДж/кг	0,60243	[0,59038; 0,61448]	0,60243	0,60243	0,60243	0,60243	0,59309
$\eta_{5т}$, ед.	0,9414	0,9414***	0,9414	0,9414	0,9414	0,9414	0,9414
ΔG , кг/с	3,7100	—	1,2047	1,3125	1,2470	1,3555	1,3101
ΔE , МВт	-0,0786	—	-0,0241	-0,0262	-0,0250	0,0029	0,0301
$F(\lambda)$	13,7703	—	4,6201	4,6940	4,6220	4,7176	4,3191
$\eta_{ГТУ}^{бр(пр)}$, %	32,24	—	31,85	31,94	31,92	31,88	32,208
$\eta_{ГТУ}^{бр(обр)}$, %	32,15	—	32,08	31,93	31,87	31,89	32,203
$\Delta\eta$, % (отн.)	0,27	—	0,72	0,05	0,15	0,03	0,02

Примечания:

* серым фоном отмечены ячейки, значения в которых находятся вне диапазона $[Y_i^{min}; Y_i^{max}]$;

** данные коммерческого учета, не подлежащие корректировке при регуляризации;

*** результаты экспертной оценки, не подлежащие корректировке при регуляризации.

По результатам исследования вариант «В-4» рекомендован для использования в комплексных системах мониторинга ТЭП работы оборудования ТЭС с ГТУ и ПГУ, поскольку обеспечивает возможность учета неопределенности измерения исходных значений всех либо выбранных параметров и минимальное рассогласование значений КПД брутто ГТУ, вычисленных по прямому и обратному балансам.

На примере ГТУ типа GTX-100 показано также влияние процедуры сведения балансов по результатам измерения контролируемых при эксплуатации параметров на результаты расчета фактических значений КПД брутто. Выявлено, что предельная величина ошибки в значениях КПД брутто, получаемых при отсутствии сведения балансов, составила в среднем 4,8% с отклонениями до 15% в отдельных режимах.

В третьей главе в соответствии с подходами, используемыми при выводе зависимостей для определения составляющих РТЭ по ТЭС паросилового цикла, получены соответствующие зависимости для расчета РТЭ ПГУ утилизационного типа:

1. РТЭ из-за отклонения фактического перепада давлений на всасе КР или перепада давлений на выходе ГТ от номинального, т у.т.:

$$\Delta B_{(\Delta P_{ГТ})} = 0,1228 \cdot \Delta Q_{КС}^{(\Delta P)} \tau_{раб}^{ГТ} / K; \quad K = \left[1 + \rho_{топл}^{(\Phi)} h_{топл}^{(\Phi)} / (3,6 \cdot Q_H^{p(\Phi)}) \right], \quad (4)$$

где $\Delta Q_{КС}^{(\Delta P)}$ – поправка к $Q_{КС}$ на отклонение перепада давлений воздуха на входе в КР или на отклонение перепада давлений на выходе ГТ, определяемая по НЭХ ГТУ, МВт; $\tau_{раб}^{ГТ}$ – время работы ГТУ, ч; $\rho_{топл}^{(\Phi)}$, кг/нм³, и $h_{топл}^{(\Phi)}$, кДж/кг – фактические значения соответственно плотности при нормальных условиях и энтальпии топливного газа на входе в КС; $Q_H^{p(\Phi)}$ – фактическое значение низшей удельной теплоты сгорания на рабочую массу топлива, поступающего в КС, кДж/нм³.

2. Общий РТЭ ГТУ, то есть РТЭ по показателю «КПД брутто ГТУ», т у.т.:

$$\Delta B_{(\eta_{ГТУ}^{бр})} = q_{ГТУ}^{бр(\Phi)} \Delta N_{КПД} \tau_{раб}^{ГТ} \cdot 10^{-3} / 7; \quad \Delta N_{КПД} = \left[B_{ГТУ}^{(\Phi)} \eta_{ГТУ}^{бр(н)} K / 12,28 - \mathcal{E}_{ГТУ} \right] / \tau_{раб}^{ГТ}, \quad (5)$$

где $q_{ГТУ}^{бр(\Phi)}$ – фактическое значение удельного расхода тепла брутто на выработку электроэнергии ГТУ, ккал/(кВт·ч) (здесь и далее – в несистемных единицах измерения, в соответствии с практикой составления технической отчетности ТЭС); $\Delta N_{КПД}$ – уменьшение $N_{ГТУ}$ ввиду отклонения фактического КПД брутто ГТУ от номинального, МВт; $B_{ГТУ}^{(\Phi)}$ – фактическое количество сожженного за период топлива в условном исчислении, т у.т.; $\eta_{ГТУ}^{бр(н)}$ – номинальное значение КПД брутто ГТУ, %; $\mathcal{E}_{ГТУ}$ – выработка электроэнергии ГТУ за период, тыс. кВт·ч.

3. РТЭ из-за отклонения фактических потерь тепла с уходящими газами КУ от номинального значения, т у.т.:

$$\Delta B_{(q_2^{КУ})} = \left(B_{ГТУ}^{(\Phi)} - 0,1228 \mathcal{E}_{ГТУ} (2 - \eta_{ЭМ}^{ГТУ}) / K \right) \cdot (q_2^{КУ(\Phi)} - q_2^{КУ(н)}) / \eta_{КУ}^{бр(н)}, \quad (6)$$

где $\eta_{ЭМ}^{ГТУ}$ – электрохимический КПД ГТУ, определяемый по НЭХ ГТУ; $q_2^{КУ(\Phi)}$ и $q_2^{КУ(н)}$ – соответственно фактическое и номинальное значения относительных потерь тепла с уходящими газами КУ, %; $\eta_{КУ}^{бр(н)}$ – номинальное значение КПД брутто КУ, %.

4. РТЭ из-за отклонения фактических потерь тепла от наружного охлаждения КУ от номинального значения, т у.т., определяется по (6) с подстановкой вместо $(q_2^{КУ(\Phi)} - q_2^{КУ(н)})$ разности $(q_5^{КУ(\Phi)} - q_5^{КУ(н)})$, где $q_5^{КУ(\Phi)}$ и $q_5^{КУ(н)}$ – соответственно фактическое и номинальное значения относительных потерь тепла от наружного охлаждения КУ, %.

5. РТЭ из-за отклонения фактической температуры уходящих газов КУ от номинального значения, т у.т.:

$$\Delta B_{(t_2^{КУ})} = \left(B_{ГТУ}^{(\Phi)} - 0,1228 \mathcal{E}_{ГТУ} (2 - \eta_{ЭМ}^{ГТУ}) / K \right) \cdot q_2^{КУ(н)} (t_2^{КУ(\Phi)} - t_2^{КУ(н)}) / \left[\eta_{КУ}^{бр(н)} \left(t_{2т}^{(\Phi)} - t_{1к}^{(\Phi)} \frac{G_{1к}^{(\Phi)}}{G_{2т}^{(\Phi)}} \right) \right], \quad (7)$$

где $t_2^{КУ(\Phi)}$ и $t_2^{КУ(н)}$ – соответственно фактическое и номинальное значения температуры уходящих газов за КУ, °С; $t_{2т}^{(\Phi)}$ и $t_{1к}^{(\Phi)}$ – фактические значения температуры соответственно дымовых газов за ГТ и воздуха перед КР, °С; $G_{2т}^{(\Phi)}$ и $G_{1к}^{(\Phi)}$ – фактические значения расходов соответственно дымовых газов за ГТ и воздуха перед КР, кг/с.

6. Общий РТЭ КУ, то есть РТЭ по показателю «КПД брутто КУ», т.у.т., определяется согласно (6) с подстановкой вместо $(q_2^{КУ(ф)} - q_2^{КУ(н)})$ разности $(\eta_{КУ}^{бр(ф)} - \eta_{КУ}^{бр(н)})$, где $\eta_{КУ}^{бр(ф)}$ – фактическое значение КПД брутто КУ, %.

7. РТЭ ПГУ из-за отклонения фактических параметров работы ПТ от их номинальных значений, т.у.т.:

$$\Delta B_{(Pi)} = q_{ПГУ}^{н(ф)} \Delta N_{Pi} \tau_{раб}^{ПТ} \cdot 10^{-3} / 7, \quad (8)$$

где $q_{ПГУ}^{н(ф)}$ – фактическое значение удельного расхода тепла нетто на выработку электроэнергии энергоблоком ПГУ, ккал/(кВт·ч); ΔN_{Pi} – поправка к электрической мощности ПТ ввиду отклонения фактического значения i -го параметра P_i от его номинального значения, МВт, определяемая по НЭХ ПТ ПГУ; $\tau_{раб}^{ПТ}$ – время работы ПТ ПГУ, ч.

8. Общий РТЭ ПТ ПГУ, то есть РТЭ по показателю «Удельный расход тепла брутто на выработку электроэнергии» $\Delta B_{(q_{ПТ}^{бр})}$ определяется по (8). При этом ΔN_{Pi} учитывает долю электрической мощности, вырабатываемой по конденсационному циклу. В ПГУ, у которых отработавший в ПТ пар направляется в сетевой подогреватель первой ступени, как правило, применяются суховоздушные градирни (СВГ). При этом в СВГ отводится избыточное количество тепловой энергии от потока сетевой воды, тем самым реализуется возможность независимого регулирования тепловой и электрической нагрузок ПГУ. Для таких ПГУ при расчете общего РТЭ ПТ ΔN_{Pi} следует определять как:

$$\Delta N_{q_{ПТ}^{бр}} = N_{ПТ} (q_{ПТ}^{бр(ф)} - q_{ПТ}^{бр(н)}) \cdot \left[1 - Q_{СВГ}^{(ф)} / (N_{ПТ} q_{ПТ}^{бр(н)} \tau_{раб}^{ПТ} \cdot 10^{-3}) \right] / q_{ПТ}^{бр(н)}, \quad (9)$$

где $N_{ПТ}$ – фактическое значение средней за период электрической мощности ПТ, МВт; $q_{ПТ}^{бр(ф)}$ и $q_{ПТ}^{бр(н)}$ – соответственно фактическое и номинальное значения удельного расхода тепла брутто на выработку электроэнергии ПТ, ккал/(кВт·ч); $Q_{СВГ}^{(ф)}$ – фактическое количество тепловой энергии, отведенное от сетевой воды в СВГ, Гкал.

9. РТЭ по затратам тепловой энергии на собственные нужды (СН) – СН ГТ, КУ, ПТ, а также технологические потери тепла, связанные с его отпуском, т.у.т.:

$$\Delta B_{(Q_{сн i})} = 1,163 \cdot (B_{ГТУ}^{(ф)} - 0,1228 \text{ Э}_{ГТУ} (2 - \eta_{ЭМ}^{ГТУ}) / K) \cdot \xi_{сн i} (Q_{сн i}^{(ф)} - Q_{сн i}^{(н)}) / (Q_{2т,ср}^{(ф)} \tau_{раб}^{ГТ} \eta_{КУ}^{бр(ф)} \cdot 10^{-2}), \quad (10)$$

где $Q_{сн i}^{(ф)}$ и $Q_{сн i}^{(н)}$ – соответственно фактическое и номинальное значения затрат тепловой энергии на СН по i -й статье, Гкал; $\xi_{сн i}$ – коэффициент ценности пара, использованного для обеспечения i -й статьи затрат тепловой энергии на СН; $Q_{2т,ср}^{(ф)}$ – фактическая средняя за отчетный период мощность потока дымовых газов ГТУ, МВт.

РТЭ ПГУ по затратам электрической энергии на СН, а также связанные с неплановыми пусками оборудования, определяются в соответствии с подходами, применяемыми для паросиловых установок.

В диссертации приведено сопоставление полученных зависимостей с известной методикой, разработанной в ПАО «Интер РАО»; показаны её недостатки. Проведена апробация предложенной уточненной методики расчета составляющих РТЭ примени-

тельно к ПГУ-116 ТЭС «Международная». Выявлено, что методика обеспечивает удовлетворительную сходимость баланса РТЭ – соотношения между суммарным РТЭ, вычисленным по значениям удельных расходов топлива и объемам отпуска электрической и тепловой энергии, и суммой составляющих РТЭ по агрегатам ПГУ.

Четвертая глава посвящена практической реализации разработанных в диссертации методик расчета технических и технико-экономических показателей ГТУ и ПГУ.

Методика сведения материального и энергетического балансов ГТУ (вариант «В-4») реализована в виде программного модуля «Сведение материального и энергетического баланса ГТУ по данным АСУТП» (№ 2023687086) с последующей его интеграцией в ранее разработанный (Зимин А.П.) программный модуль «Баланс», который обеспечивает сведение материального и энергетического балансов ТЭС паросилового цикла, а также водопарового тракта и системы подогрева сетевой воды ПГУ-ТЭС. Возникающую при этом задачу многокритериальной оптимизации предложено решать путем замены нескольких критериев оптимизации одним аддитивным критерием:

$$F_{\Sigma} = \sum_{k=1}^{\bar{K}} a_{M,k} F_{M,k}(\mathbf{V}_k, \lambda_k) + \sum_{k=1}^{\bar{K}} a_{E,k} F_{E,k}(\mathbf{H}_k, \lambda_{E,k}) + \sum_{p=1}^{\bar{P}} a_{G,p} F_{G,p}(\mathbf{Y}_{G,p}, \lambda_{G,p}) \rightarrow \min, \quad (11)$$

где $\bar{K}$ и $\bar{P}$ – количество рассматриваемых при сведении балансов ПГУ тепловых схем с водным теплоносителем и ГТУ соответственно; $a_{M,k}$, $a_{E,k}$ и $a_{G,p}$ – весовые коэффициенты; $F_{M,k}(\mathbf{V}_k, \lambda_k)$ и $F_{E,k}(\mathbf{H}_k, \lambda_{E,k})$ – целевые функции оптимизации, соответствующие материальному и энергетическому балансам k -й тепловой схемы с водным теплоносителем (формулировка задачи, предложенная Зиминим А.П.); $F_{G,p}(\mathbf{Y}_{G,p}, \lambda_{G,p})$ – целевая функция оптимизации, соответствующая балансу p -й ГТУ, входящий в состав ПГУ.

Коэффициенты $a_{M,k}$, $a_{E,k}$ и $a_{G,p}$ определяются на основе анализа результатов вариантов расчетов для конкретной ПГУ. Выявлено, что в большинстве случаев коэффициент $a_{M,k}$ может быть принят равным средней энтальпии теплоносителя в k -й тепловой схеме, а коэффициенты $a_{E,k}$ и $a_{G,p}$ равными или близкими к 1.

Разработанные методика сведения балансов ГТУ и методика расчета составляющих РТЭ ПГУ, а также их компьютерная реализация апробированы применительно к ПГУ ТЭС «Международная» с энергоблоками ПГУ-116 и ПГУ-120. Обеспечено совместное сведение балансов в связке «ГТУ – КУ – ПТ» с учетом разной степени достоверности измерения контролируемых параметров и повышение тем самым точности расчета фактических и номинальных показателей тепловой экономичности оборудования. Эффективность разработанных методик иллюстрирует выполненный специальный расчет по ПГУ-120 за один из месяцев (см. таблицу 3), при котором РТЭ определялись трижды: 1 – с предварительным сведением балансов по (11), т.е. с учетом балансов ГТУ; 2 – с предварительным сведением балансов без ГТУ (в постановке задачи Зимина А.П.); 3 – без сведения балансов, т.е. при использовании данных АСУ ТП.

По результатам расчетов за год выявлено, что использование разработанных мето-

дик позволяет обеспечить практически полную сходимость баланса РТЭ: в большинстве режимов отклонение РТЭ, рассчитанного по удельным расходам топлива и отпуску энергии, и суммы составляющих РТЭ меньше 0,1% от расхода топлива. Установлено также, что сведение балансов ГТУ при расчете ТЭП с использованием разработанной методики позволило избежать ошибки при определении РТЭ на уровне 910 т у.т./год, что эквивалентно сумме 7,344 млн. руб. (в ценах 2023 года).

Таблица 3. Результаты расчета РТЭ ПГУ-120

Показатель, единица измерения	Значение по вариантам расчета		
	1	2	3
Суммарный РТЭ, т у.т./мес.	101	222	222
Сумма составляющих РТЭ, т у.т./мес.	105	551	579
Невязка баланса по РТЭ, т у.т./мес (%)	-3 (-3,2)	-329 (-148,3)	-357 (-160,8)

Методика сведения балансов ГТУ и ПГУ в целом апробирована также применительно к ПГУ-450 Уренгойской ГРЭС (см. рисунок).

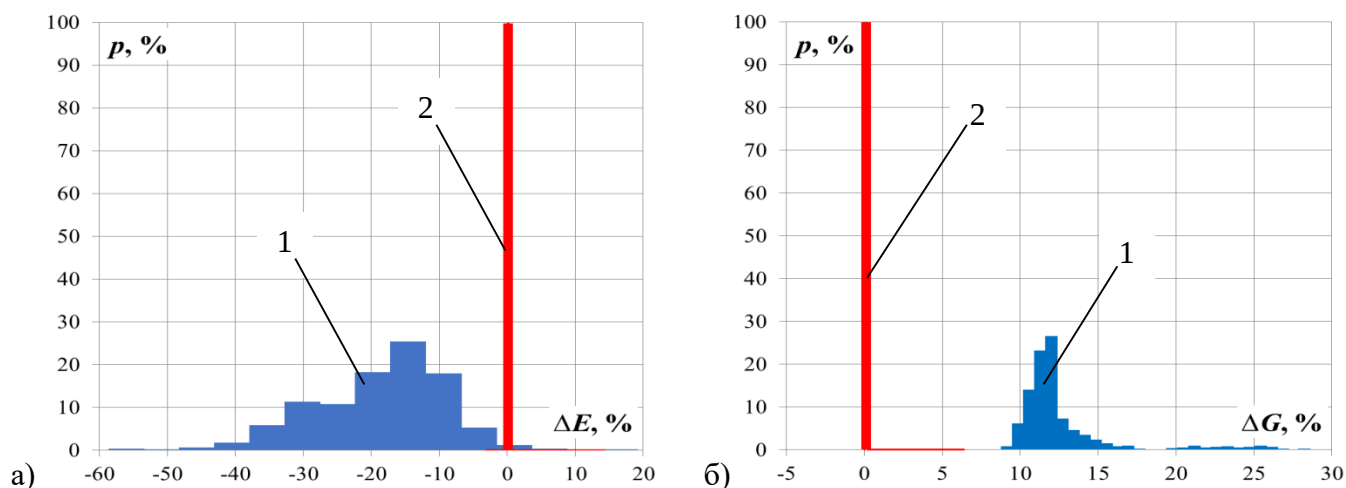


Рисунок. Примеры результатов оценки плотности распределения вероятности возникновения невязки балансов по элементам ПГУ-450: а) энергетического баланса ГТУ-1; б) материального баланса контура высокого давления КУ-2; ΔE и ΔG , % – относительные невязки соответственно энергетического и материального балансов; p , % – вероятность возникновения невязки баланса; 1 – до сведения балансов; 2 – после сведения балансов

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведен комплекс исследований, в рамках которого разработаны и апробированы на ряде эксплуатируемых энергоблоков методики расчета технических и технико-экономических показателей работы парогазовых установок ТЭС: методика сведения материального и энергетического балансов по результатам измерения контролируемых параметров ГТУ; методика расчета составляющих резерва тепловой экономичности оборудования ПГУ утилизационного типа. Внедрение результатов исследования обеспечивает повышение эффективности эксплуатации парогазовых установок ТЭС в части точности и обоснованности определения показателей, характеризующих техническое состояние оборудования и совершенство режимов его работы.

2. В рамках подхода регуляризации Тихонова к решению некорректных задач раз-

работана методика совместного сведения материального и энергетического балансов ГТУ по данным технического учета, позволяющая обоснованно корректировать результаты измерения контролируемых параметров исходя из условия сведения балансов по аддитивным параметрам с учетом метрологических характеристик используемых средств измерения. Предложенные варианты скалярной и векторной постановок задачи, их аналитические и численные решения апробированы применительно к условиям промышленной эксплуатации ГТУ типа GTX-100. Для реализации в комплексных системах мониторинга технико-экономических показателей ТЭС с ГТУ и ПГУ обоснован выбор варианта векторной постановки задачи с учетом неопределенности определения исходных значений расходов теплоносителей и электрической мощности, а также теплотехнических параметров теплоносителей (энтальпии, давления, температуры) и её численного решения методом статистического программирования. При этом обеспечивается рассогласование значений КПД брутто ГТУ, вычисленных по прямому и обратному балансам, не более 0,02 % (отн.). Разработанная методика сведения балансов ГТУ реализована в виде программного модуля «Сведение материального и энергетического баланса газотурбинной установки по данным АСУТП».

3. На основе предложенной методики сведения балансов ГТУ и известной методики сведения балансов в пароводяном тракте ТЭС разработана методика совместного сведения материальных и энергетических балансов по ПГУ в целом. Получены количественные характеристики влияния методики сведения балансов на показатели тепловой экономичности оборудования энергоблоков ПГУ-116, ПГУ-120 и ПГУ-450. Доказана необходимость проведения расчетов по сведению материального и энергетического балансов совместно по всем агрегатам и технологическим системам ПГУ.

4. Разработана усовершенствованная методика расчета составляющих резерва тепловой экономичности оборудования ПГУ утилизационного типа, отличающаяся от известной методики ПАО «Интер РАО» корректным учетом теплосодержания топливного газа на входе в камеры сгорания ГТУ, учетом особенностей тепловых схем ПГУ с суховоздушными градирнями для охлаждения сетевой воды, а также расширенным перечнем определяемых составляющих резерва тепловой экономичности для повышения объективности оценки технического состояния оборудования и уровня его эксплуатации. Применение разработанной методики обеспечивает удовлетворительное соответствие суммарного резерва тепловой экономичности, вычисленного по значениям удельных расходов топлива и объемам отпуска электрической и тепловой энергии ПГУ, и суммой составляющих резерва тепловой экономичности по отдельным агрегатам и технологическим системам ПГУ.

5. Практическая реализация результатов работы, подтвержденная тремя актами внедрения, проведена в рамках следующих направлений:

5.1. Разработанные программный модуль по сведению материального и энергетиче-

ского балансов, а также методика расчета составляющих резерва тепловой экономичности ПГУ интегрированы в комплексную систему мониторинга технико-экономических показателей и оптимизации загрузки оборудования парогазовой ТЭС «Международная» (г. Москва) с энергоблоками ПГУ-116, ПГУ-120. В результате обеспечено повышение объективности оценки технического состояния и уровня эксплуатации оборудования, что доказывается удовлетворительным соответствием друг другу показателей, определяемых альтернативными способами (по прямому и обратному балансам), а также приемлемой сходимостью баланса по резервам тепловой экономичности с невязками менее 0,10 % от количества сожженного топлива. Сведение балансов ГТУ на предварительном этапе расчета технико-экономических показателей с использованием разработанной методики позволило избежать ошибки при определении резерва тепловой экономичности на уровне 910 т у.т./год, что эквивалентно сумме 7,344 млн. руб. (в ценах 2023 года). Такая ошибка может быть критичной как при формировании годового плана ремонтов оборудования ТЭС, так и с точки зрения тарифных последствий для потребителей в случае, если ошибочно вычисленный резерв тепловой экономичности будет заложен в расчет прогнозных удельных расходов топлива на предстоящий период тарифного регулирования.

5.2. Разработанная методика сведения балансов по данным эксплуатационного контроля ПГУ положена в основу программного комплекса «Программа для реализации алгоритма сведения материального и теплового баланса основного оборудования и групп оборудования филиала «Уренгойская ГРЭС» АО «Интер РАО – Электрогенерация», внедренного в рамках НИОКР в практику расчета показателей тепловой экономичности на Уренгойской ГРЭС. Эффективность программного комплекса доказана в ходе поверочных расчетов 8712 различных режимов работы ПГУ-450. При сведении балансов по данным контролируемых при эксплуатации оборудования параметров обеспечена высокая точность определения технических показателей работы оборудования, что доказывается сходимостью энергетического баланса ГТУ с невязкой не более 0,04 %, материального и энергетического балансов котла-утилизатора с невязками не более соответственно 0,10 % и 0,07 %, материального баланса парового коллектора собственных нужд с невязкой не более 0,08 %.

5.3. Разработанная методика расчета составляющих резерва тепловой экономичности ПГУ включена в реализуемые ИГЭУ дополнительные профессиональные образовательные программы в рамках повышения квалификации специалистов электростанций и генерирующих компаний.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы. Дальнейшие исследования по тематике диссертационной работы целесообразно проводить в направлении создания методов и программных средств диагностики систем мониторинга технических и технико-экономических по-

казателей работы оборудования, оценки эффективности работы эксплуатационного персонала на основе предложенных методик сведения балансов, а также в направлении применения разработанных методик в системах оптимизации режимов работы электростанций с ПГУ с целью верификации используемых в них математических моделей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. **Зиновьева, А.С.** Методика совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных технологий / **А.С. Зиновьева**, С.Д. Горшенин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков // Вестник ИГЭУ, 2023, вып. 1. с. 5–10.
2. **Зиновьева, А.С.** Векторная постановка задачи совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, С.И. Шувалов // Вестник ИГЭУ, 2023, вып. 5. с. 5–11.
3. **Зиновьева, А.С.** Разработка методики расчета составляющих резерва тепловой экономичности парогазовых установок / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский, Е.В. Зиновьева, С.Д. Горшенин, А.А. Борисов // Вестник ИГЭУ, 2024, вып. 5. с. 5–13.
4. Федоров, Д.С. Определение поправок к показателям тепловой экономичности ГТУ при разработке нормативных энергетических характеристик по данным эксплуатационных наблюдений / Д.С. Федоров, **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский // Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 2. с. 5–11.
5. **Зиновьева, А.С.** Сведение материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности ГТУ с учетом неопределенности результатов измерения теплотехнических параметров теплоносителей / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, А.А. Борисов, С.Д. Горшенин // Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 3. с. 5–12.

Результаты интеллектуальной деятельности

6. Ледуховский, Г.В. Программа для ЭВМ: «Сведение материального и энергетического баланса газотурбинной установки по данным АСУТП» / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, **А.С. Зиновьева** // Свид. о госуд. регистр. программы для ЭВМ № 2023687086 : зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 11.12.2023.
7. Борисов, А.А. Программа для ЭВМ: «Программа для реализации алгоритма сведения материального и теплового баланса основного оборудования и групп оборудования филиала «Уренгойская ГРЭС» АО «Интер РАО - Электрогенерация» / А.А. Борисов, С.Д. Горшенин, Г.В. Ледуховский, **А.С. Зиновьева** // Свид. о госуд. регистр. программы для ЭВМ № 2023687983 : зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 19.12.2023.

Тезисы и полные тексты докладов конференций

8. **Зиновьева, А.С.** Проблема сведения балансов при обработке экспериментальных данных по парогазовым установкам ТЭС / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский // Теплоэнергетика // Семнадцатая всеросс. (девятая междунар.) науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия-2022»: Матер. конф. В 6 т. Т.1 – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2022. – 215 с. – С. 22.
9. **Зиновьева, А.С.** Влияние метода сведения материального и энергетического балансов на фактические показатели ГТУ / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский // Теплоэнергетика // Семнадцатая всеросс. (девятая междунар.) науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия-2022»: Матер. конф. В 6 т. Т.1 – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2022. – 215 с. – С. 23.
10. **Зиновьева, А.С.** О сведении материального и энергетического балансов при расчете показателей тепловой экономичности парогазовых установок / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности // II науч.-техн. конф. студ. и асп. с междунар. участием (г. Ульяновск, 30 сентября 2022 г.) : Сб. науч. трудов. – Ульяновск : УлГТУ, 2022. – 267 с. – С. 140–143.
11. Ледуховский, Г.В. Совершенствование методик сведения материального и энергетического балансов по паротурбинным и газотурбинным установкам ТЭС в задачах расчета показателей тепловой экономичности оборудования / Г.В. Ледуховский, **А.С. Зиновьева**, С.Д. Горшенин, В.П. Жуков, А.П. Зимин // Расчет и анализ технико-экономических показателей (ТЭП) электростанций и генерирующих компаний в современных условиях. Перспективы совершенствования и оптимизации нормативно-технической документации по топливоиспользованию (НТД ТИ): Сб. докл. / под общ. ред. канд. техн. наук Н.В. Иванова // Всеросс. науч.-техн. конф. – М.: ОАО «ВТИ», 2022. – 126 с. – С. 77–85.
12. **Зиновьева, А.С.** Методика сведения материального и энергетического балансов при расчете фак-

- тических показателей тепловой экономичности ГТУ / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: Матер. Национальной с междунар. участием науч.-практ. конф. студ., асп., ученых и специалистов (20-22 декабря 2022 г.). В 2-х т. Т. 1 / отв. ред. А.Н. Халин. – Тюмень: ТИУ, 2022. – 306 с. – С. 178–181.
13. **Зиновьева, А.С.** Методика сведения материального и энергетического балансов при расчете технико-экономических параметров ГТУ / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : Сб. матер. VII Междунар. науч.-практ. конф., 7-9 декабря 2022. [Электронный ресурс] / Под ред.: Р.В. Беляевский, И.А. Лобур. – Кемерово : КузГТУ, 2023. – 132-1-5. – URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2023/energ/pages/sections.htm>.
14. **Зиновьева, А.С.** Сведение материального и энергетического балансов при расчете ТЭП ГТУ / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Двадцать девятая Междунар. науч.-техн. конф. студ. и асп.: Тез. докл. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2023. – 1240 с. С. 901.
15. **Зиновьева, А.С.** Разработка методики анализа достоверности данных системы технического учета показателей работы ГТУ в рамках концепции регуляризации Тихонова при решении некорректных задач / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, А.А. Борисов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии // Междунар. науч.-техн. конф. «XXII Бенардосовские чтения»: 31 мая-2 июня 2023 г. Материалы конф. Т 2 / Под. ред. Г.В. Ледуховского, В.В. Тютюкова, В.А. Шуина [и др.]. – Иваново: ФГБОУ ВО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2023. – 468с. С. 58–61.
16. **Зиновьева, А.С.** Регуляризация материальных и энергетических потоков в газотурбинных установках при расчете фактических показателей тепловой экономичности оборудования / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, А.А. Борисов // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики: III Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Ульяновск, 9 - 11 октября 2023): Сб. тр. конф. – Ульяновск: УлГТУ, 2023. – 124 с. С. 81-85.
17. **Зиновьева, А.С.** Методика сведения материального и энергетического балансов в векторной постановке при расчете фактических показателей тепловой экономичности ГТУ / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: Матер. Национальн. с междунар. участием науч.-практ. конф. студ., асп., ученых и специалистов (20-22 декабря 2023 г.) / отв. ред. А.Н. Халин. – Тюмень: ТИУ, 2023. – 401 с. – С. 97–100.
18. **Зиновьева, А.С.** Сведение материального и энергетического балансов в векторной постановке при расчете технико-экономических показателей ГТУ / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: Сб. матер. VIII Междунар. науч.-практ. конф., 6 – 8 декабря 2023. [Электронный ресурс] / Под ред.: Р.В. Беляевский, И.А. Лобур. – Кемерово : КузГТУ, 2024. – С. 145-1-5. – URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2024/energ/index.htm>.
19. **Зиновьева, А.С.** Об особенностях расчета фактических показателей ГТУ / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский // Теплоэнергетика // Девятнадцатая всеросс. (одиннадцатая междунар.) науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия-2024»: Матер. конф. В 6 т. Т.1 – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2024. – 160 с. – С. 9–10.
20. **Зиновьева, А.С.** Совершенствование методики расчета резервов тепловой экономичности парогазовых установок / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский // Энергоэффективные технологии в строительстве, энергетике и жилищно-коммунальном хозяйстве : V науч.-техн. конф. студ. и асп. с междунар. участием (г. Ульяновск, 30 сентября 2024 г.) : Сб. науч. тр. – Ульяновск : УлГТУ, 2024. – 210 с. С. 54–58.
21. **Зиновьева, А.С.** Совершенствование оценки резервов тепловой экономичности ПГУ / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский, С.Д. Горшенин, А.А. Борисов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии // Междунар. науч.-техн. конф. «XXIII Бенардосовские чтения»: 29-31 мая 2025 г. Матер. конф. Т 2 / Под. ред. Г.В. Ледуховского, В.В. Тютюкова, В.А. Шуина [и др.]. – Иваново: ФГБОУ ВО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2025. – 408с. С. 65–67.
22. **Зиновьева, А.С.** Регуляризация материальных и энергетических потоков ГТУ с учетом неопределенности измерения расходов и теплофизических параметров теплоносителей / **А.С. Зиновьева**, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии // Междунар. науч.-техн. конф. «XXIII Бенардосовские чтения»: 29-31 мая 2025 г. Матер. конф. Т 2 / Под. ред. Г.В. Ледуховского, В.В. Тютюкова, В.А. Шуина [и др.]. – Иваново: ФГБОУ ВО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2025. – 408с. С. 68–71.

Зиновьева Анастасия Сергеевна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК ТЭС

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 17.10.2025 г. Формат 60х84¹/₁₆ Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 69

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ