

На правах рукописи



ЗИМИН Артём Павлович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ТЕПЛОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС**

Специальность: 05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иваново 2017

Работа выполнена на кафедре «Тепловые электрические станции» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент **Ледуховский Григорий Васильевич**

Официальные оппоненты:

Щинников Павел Александрович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры «Тепловые электрические станции»;

Замалеев Мансур Масхутович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция».

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск.

Защита состоится «24» ноября 2017 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertation_Zimin_A.P..pdf.

Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01,
доктор технических наук, доцент

Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При эксплуатации ТЭС возникает необходимость расчета технико-экономических показателей (ТЭП) работы оборудования на основе результатов измерения параметров потоков теплоносителей. В частности, такие задачи решаются при проведении тепловых (балансовых, функциональных) испытаний теплоэнергетического оборудования, а также при составлении ежемесячной технической отчетности ТЭС о тепловой экономичности. Действующими нормативными документами энергетической отрасли, регламентирующими указанные виды работ, предписано проведение предварительного этапа расчетов, заключающегося в сведении материальных и энергетических балансов по рассматриваемой установке, технологической схеме или ТЭС в целом. Невязка баланса, в общем случае, может быть обусловлена метрологическим несовершенством приборов учета, их неисправностью или отсутствием. Система балансовых уравнений, составленных для некоторой технологической схемы ТЭС, чаще недоопределена, что обуславливает возможность получения наиболее вероятного, но не детерминированного решения. При этом результаты решения существенно зависят от величины исходного небаланса.

Применительно к рассматриваемым случаям решаемые в соответствии с требованиями нормативных документов задачи сведения балансов следует разделить на две группы: 1) проверка соответствия наблюдаемой невязки баланса метрологическим характеристикам используемых приборов – требуется на этапе ежесуточной оценки достоверности данных технического учета (результатов измерения параметров потоков теплоносителей); 2) собственно сведение материальных и энергетических балансов по участку тепловой схемы, установке или ТЭС в целом – выполняется при обработке результатов испытаний оборудования, а также при расчете показателей тепловой экономичности за отчетный период (нормативным отчетным периодом является месяц).

Нормативными документами регламентированы требования к процедурам сведения балансов, которые имеют ряд объективных недостатков: а) при ежесуточной оценке достоверности данных технического учета предписывается проведение контроля сходимости только материального баланса и только по одному наиболее технологически значимому контуру (участку тепловой схемы от расходомеров питательной воды котлов до расходомеров свежего пара турбоагрегатов) без учета балансов по прочим участкам тепловой схемы ТЭС, при этом задается заранее завышенная максимально допустимая величина небаланса (2–3 %), не учитывающая различной степени достоверности определения исходных значений каждого параметра в конкретных случаях; б) при сведении баланса предполагается равномерное разнесение невязки между расходной и приходной частями соответствующего балансового уравнения, что также не учитывает разную степень достоверности получения исходных значений параметров (результатов измерения, экспертных оценок); в) сведение материальных балансов осуществляется без согласования с энергетическими балансами, что не позволяет оценить качество измерения давления и температуры потоков теплоносителей.

На практике наличие указанных недостатков приводит к существенным ошибкам при расчете ТЭП. При существующем подходе к оценке достоверности данных системы технического учета эти ошибки списываются на недостатки эксплуатации либо плохое техническое состояние оборудования, а отчетные показатели тепловой экономичности ТЭС оказываются искаженными.

Таким образом, актуальной задачей с точки зрения повышения объективности расчета ТЭП оборудования ТЭС является разработка расчетных алгоритмов, обеспечивающих возможность учета при сведении балансов различной степени достоверности определения параметров исходной информации, метрологических и технологических ограничений по всем или некоторым выбранным узлам тепловой схемы, а также возможность установле-

ния степени соответствия расчетных невязок балансов по контролируемым узлам схемы номинальным характеристикам погрешности системы мониторинга с возможностью локализации источника ошибки.

Актуальность темы диссертации подтверждается её соответствием приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», критической технологии «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе» (согласно указу Президента РФ № 899 от 07.07.2011 г.).

Степень разработанности темы диссертации. Известен ряд альтернативных методов повышения достоверности и надежности информационного обеспечения АСУ ТП ТЭС и подходов к решению задачи повышения объективности расчета показателей тепловой экономичности энергетического оборудования по результатам измерения параметров потоков теплоносителей. Эти методы предусматривают проведение корректировки измеренных значений параметров по условиям согласования материальных, энергетических, эксергетических балансов в системе, привлечение каких-либо замещающих моделей (термодинамических соотношений, методов математической статистики и теории вероятностей, нейросетевого моделирования). Однако к настоящему времени не предложены формализованные подходы к решению рассматриваемой задачи, которые могли бы быть использованы для схемы с произвольной конфигурацией потоков производственным персоналом ТЭС. Кроме того, отсутствуют исчерпывающие данные о влиянии используемых методик сведения балансов в технологических системах по данным технического учета на результаты расчета фактических и номинальных значений показателей тепловой экономичности ТЭС различного типа (паротурбинных, парогазовых), отсутствуют данные о влиянии метода сведения балансов при обработке результатов гарантийных испытаний турбоустановок на степень достоверности результатов испытаний.

Целью диссертации является совершенствование оценки показателей качества агрегатов ТЭС путем разработки и реализации методик сведения материальных и энергетических балансов.

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

1) разработка методики оценки соответствия рассчитываемых по результатам измерения расходов теплоносителей невязок материального баланса по узлам энергетической системы нормативным метрологическим характеристикам используемых средств измерения;

2) разработка методики сведения материальных и совместно материальных и энергетических балансов по результатам измерения параметров потоков теплоносителей в энергетических системах;

3) реализация разработанной методики сведения балансов в виде программного модуля, ориентированного на решение прикладных задач обработки результатов тепловых испытаний и расчета ТЭП оборудования ТЭС;

4) проведение гарантийных тепловых испытаний паротурбинной установки ТЭС и обработка полученных данных с использованием разработанной методики сведения балансов для выявления степени влияния метода первичной обработки результатов измерения параметров на результаты расчета основных показателей тепловой экономичности турбоагрегата;

5) оценка изменения фактических и номинальных значений ТЭП оборудования и значений резерва тепловой экономичности при внедрении разработанного программного модуля для сведения балансов в программно-технический комплекс действующей ТЭС.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности *в части формулы специальности*: «...проблемы совершенствования действующих ... технологий производства электрической энергии и тепла»; «...поиск приемов и мето-

дов оптимизации рабочих режимов оборудования»; «...технико-экономические ... исследования»; *в части области исследования* – пункту 1: «Разработка научных основ методов расчета... показателей качества и режимов работы агрегатов, систем и тепловых электростанций в целом»; пункту 3: «... исследование, совершенствование действующих ... технологий производства электрической энергии и тепла»; пункту 6: «Разработка вопросов эксплуатации систем и оборудования тепловых электростанций».

Научная новизна работы обусловлена следующим:

1. На основе подхода регуляризации Тихонова к решению некорректных задач предложена методика оценки соответствия рассчитываемых по данным технического учета невязок материального баланса нормативным метрологическим характеристикам используемых средств измерения с локализацией источника ошибки, получены аналитические и численные решения задачи.

2. Предложенный подход обобщен на методику совместного сведения материальных и энергетических балансов в тепловой схеме ТЭС по данным технического учета, позволяющую учесть различную степень достоверности определения параметров исходной информации, метрологические и технологические ограничения по всем или некоторым выбранным узлам схемы.

3. Выявлено, что для паротурбинной ТЭС с поперечными связями методика сведения балансов оказывает наибольшее влияние на результаты расчета номинальных значений показателей тепловой экономичности оборудования; при использовании различных методик сведения балансов значения номинального количества сожженного топлива по ТЭС отличаются друг от друга на величину, сопоставимую с утвержденным нормативно-технической документацией по топливоиспользованию резервом тепловой экономичности.

4. Показано, что для парогазовой ТЭС без дожигания топлива в котлах-утилизаторах методика сведения балансов не оказывает значимого влияния на результаты расчета фактических и номинальных значений удельных расходов топлива на отпуск тепловой и электрической энергии, но существенно влияет на результаты расчета промежуточных показателей тепловой экономичности отдельных агрегатов.

Теоретическая значимость работы обусловлена следующим. Доказано определяющее влияние методики сведения материальных и энергетических балансов по данным технического учета на результаты расчета показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. Применительно к проблематике диссертации результативно использованы методы моделирования структуры потоков энергетических систем на основе теории графов, решения некорректных задач в рамках подхода регуляризации Тихонова, статистического программирования. Изложены основные положения предложенных методов оценки соответствия рассчитываемых по данным технического учета невязок материального баланса нормативным метрологическим характеристикам используемых средств измерения, а также сведения материальных, энергетических и совместно материальных и энергетических балансов в тепловой схеме ТЭС по данным технического учета. Раскрыта проблема экспериментального подтверждения номинальных показателей работы паротурбинных установок путем проведения гарантийных тепловых испытаний при использовании нормативного метода обработки их результатов. Изучена степень влияния используемой методики сведения материальных и энергетических балансов по данным технического учета на результаты расчета основных и промежуточных показателей тепловой экономичности паротурбинных и парогазовых ТЭС.

Практическая значимость результатов заключается в следующем:

1. Предложенные методы сведения балансов в энергетических системах реализованы в виде программного модуля «Баланс», ориентированного на решение прикладных задач обработки результатов тепловых испытаний и расчета ТЭП оборудования ТЭС.

2. Разработанная методика сведения материальных балансов по результатам измерений параметров потоков теплоносителей в тепловой схеме использована при обработке результатов гарантийных тепловых испытаний турбоагрегата ПТ-26/29-2,9/1,3 Кизеловской ГРЭС; выявлено, что от выбора методики сведения балансов зависит признание турбоагрегата соответствующим гарантированным заводом-изготовителем показателям.

3. Предложенная методика совместного сведения материальных и энергетических балансов реализована в составе программного комплекса «ТЭС-Эксперт», разработанного для Омской ТЭЦ-4, что обеспечило повышение достоверности результатов расчета составляющих резерва тепловой экономичности оборудования.

4. Программный модуль «Баланс» интегрирован в программно-технический комплекс действующей парогазовой ТЭС, что обеспечило значимое уменьшение различий между фактическими и номинальными значениями промежуточных ТЭП отдельных агрегатов.

Методы исследований. Для получения результатов в работе использованы методы теории графов, решения некорректных задач в рамках подхода регуляризации Тихонова, статистического программирования, проведения тепловых испытаний паротурбинных установок ТЭС, балансовых расчетов технологических схем энергоустановок, расчетов показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждаются использованием апробированных методов моделирования теплоэнергетических установок; проведением экспериментальных исследований в условиях промышленной эксплуатации турбоагрегата с использованием стандартизованных методов измерения параметров и обработки данных; согласованностью результатов работы с опубликованными данными; проверкой и подтверждением в условиях промышленной эксплуатации основных положений диссертации.

Автор защищает:

– методику оценки соответствия рассчитываемых по результатам измерения расходов теплоносителей невязок материального баланса по узлам энергетической системы нормативным метрологическим характеристикам используемых средств измерения;

– методики сведения материальных и совместно материальных и энергетических балансов по результатам измерения параметров потоков теплоносителей в энергетических системах и результаты их программной реализации;

– методику проведения и результаты гарантийных тепловых испытаний турбоагрегата ПТ-26/29-2,9/1,3 Кизеловской ГРЭС при использовании различных методов сведения балансов при обработке результатов измерения параметров потоков теплоносителей;

– результаты расчетных исследований по определению влияния используемой методики сведения балансов по данным технического учета на результаты расчета фактических и номинальных значений ТЭП оборудования и значений резерва тепловой экономичности паротурбинной и парогазовой ТЭС.

Реализация результатов работы. Предложенная методика совместного сведения материальных и энергетических балансов, реализованная в программном модуле «Баланс», внедрена в производственный процесс ПГУ-ТЭС «Международная» ООО «Ситиэнерго» (г. Москва), где используется при ежесуточном контроле системы технического учета (путем оценки невязок материальных балансов по отдельным узлам тепловой схемы и анализа динамики их изменения во времени), а также при ежемесячных расчетах показателей тепловой экономичности оборудования в рамках подготовки государственной статистической отчетности (путем совместного сведения материальных и тепловых балансов, сведения топливного и электрического балансов с расчетом фактических и номинальных значений технико-экономических показателей). Экономический эффект от внедрения методики обусловлен выявленным резервом тепловой экономичности в количестве 1308 т у.т./ год. Предложенная методика совместного сведения материальных и энергетических

ческих балансов использована при разработке программного комплекса «ТЭС-Эксперт» для Омской ТЭЦ-4, предназначенного для расчета фактических и номинальных значений показателей тепловой экономичности оборудования и составляющих резерва тепловой экономичности, а также для оптимизации загрузки оборудования. Основные полученные в работе результаты используются в Ивановском государственном энергетическом университете (ИГЭУ) при подготовке магистров по профилю «Тепловые электрические станции», а также при повышении квалификации работников производственно-технических отделов ТЭС на базе Института повышения квалификации и переподготовки кадров (в энергетике) при ИГЭУ по программе «Расчеты фактических, номинальных, нормативных ТЭП и составляющих резерва тепловой экономичности. Оптимизация режимов работы оборудования ТЭС». Реализация результатов работы подтверждена тремя актами внедрения.

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в разработке методики оценки соответствия рассчитываемых по результатам измерения расходов теплоносителей невязок материального баланса по узлам энергетической системы нормативным метрологическим характеристикам используемых средств измерения; обобщении предложенного подхода на методику сведения материальных и энергетических балансов по результатам измерения параметров потоков теплоносителей в энергетических системах; разработке машинного кода прикладного программного модуля «Баланс»; в разработке методики и непосредственном участии в проведении гарантийных тепловых испытаний турбоагрегата ПТ-26/29-2,9/1,3 Кизеловской ГРЭС, обработке полученных данных при использовании различных методов сведения балансов по результатам измерений параметров потоков теплоносителей; проведении расчетных исследований по определению влияния используемой методики сведения балансов по данным технического учета на результаты расчета фактических и номинальных значений ТЭП оборудования и значений резерва тепловой экономичности паротурбинной и парогазовой ТЭС, обобщении и анализе полученных результатов; подготовке основных публикаций по тематике исследования.

Апробация работы. Основные результаты диссертации опубликованы и обсуждались на тринадцати международных, всероссийских и региональных конференциях: XIX, XX, XXI Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2013, 2014, 2015 гг.); VIII, IX, X, XI, XII Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (Иваново, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.); XXVI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Нижний Новгород, 2013 г.); Национальном конгрессе по энергетике (Казань, 2014 г.); XVIII и XIX Международных научно-технических конференциях «Бенардосовские чтения» (Иваново, 2015, 2017 гг.); VII Международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике и промышленности» (Ульяновск, 2017 г.).

Публикации. Материалы диссертации отражены в 19 опубликованных работах, в том числе, в 5 статьях в рецензируемых журналах по списку ВАК (включая 1 статью в издании, индексируемом в международной базе Scopus), 13 тезисах и полных текстах докладов конференций; 1 учебном пособии.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников из 146 наименований. Текст диссертации изложен на 233 стр. машинописного текста, содержит 33 рисунка, 18 таблиц и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая ценность и практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту; обосновано соответствие диссертации заяв-

ленной научной специальности, достоверность результатов; приведены сведения об апробации и реализации результатов работы; дана характеристика структуры диссертации.

В первой главе проведен анализ опубликованных данных по тематике исследования. Коллективом Новосибирского государственного технического университета (Овчинников Ю.В., Ноздренко Г.В., Щинников П.А. и др.) предложен метод согласования балансов для повышения точности исходной информации при расчете ТЭП по энергоблоку, базирующийся на сочетании точных термодинамических соотношений и вероятностно-статистических подходов. К каждому члену балансового уравнения вводится поправка; для нахождения значений поправок используются разложение балансового уравнения в ряд Тейлора и дополнительные условия, вытекающие из представления о наиболее вероятном распределении погрешностей как минимуме взвешенной суммы квадратов поправок с нахождением коэффициентов пропорциональности методом неопределенных множителей Лагранжа. Предложенный метод развит авторами на метод согласования энергобалансов энергоблоков ТЭС на основе оптимизационно-эксергетической методологии, в рамках которого в дополнение к материальному и энергетическому балансам рассматривается также эксергетический баланс. Рассматриваемые методы разработаны при допущении о нормальном законе распределения случайных погрешностей для совокупности измерений по энергоблоку. Такое допущение оказывается необоснованным, например, при выходе из строя отдельных приборов или эпизодических сбоях в их работе. Кроме того, авторами не предложен формализованный подход к постановке и решению задачи сведения балансов рассматриваемым методом, который мог бы быть использован для схемы с произвольной конфигурацией потоков производственным персоналом ТЭС. Аналогичный рассмотренному подходу предложен в работах Анищенко В.А., Щербич В.И. и др.

В работах авторов Московского энергетического института (Аракелян Э.К., Панько М.А., Арутюнян Т.М., Сабанин В.Р., Репин А.И., Смирнов Н.И. и др.) предложен ряд методов повышения достоверности и надежности информационного обеспечения АСУ ТП ТЭС. Задачи, решаемые авторами, в основном касаются проблемы замещения результатов измерений параметров при сбоях системы мониторинга. При этом используются различные подходы: оценка значения не измеряемого параметра по значениям функционально связанных с ним измеряемых параметров, использование автокорреляционных функций, методы нейросетевого моделирования и др.

Во всех случаях при сведении материальных и энергетических балансов в качестве целевой функции может рассматриваться некоторый компромисс между балансами потоков энергии и вещества по узлам и показаниями измерительных приборов, которые учитываются при построении целевой функции в виде слагаемых или сомножителей. В этом отношении задача сведения балансов по постановке и используемому математическому аппарату решения аналогична задачам регуляризации, рассмотренным в работах академика Тихонова А.Н. При этом готового решения задачи применительно к рассматриваемой технологической проблеме в литературе не предложено.

По результатам анализа опубликованных данных конкретизированы задачи работы.

Вторая глава посвящена разработке методики оценки соответствия рассчитываемых по результатам измерения расходов теплоносителей невязок материального баланса по узлам энергетической системы нормативным метрологическим характеристикам используемых средств измерения (задача №1), а также методики сведения материальных, энергетических и совместно материальных и энергетических балансов по результатам измерения параметров потоков теплоносителей в энергетических системах (задача №2).

Разработанные методики рассматриваются на примере участка тепловой схемы ТЭС (рисунок 1). Для описания структуры системы используется направленный граф $G = (X, V)$ (рисунок 2). В качестве узлов графа (X_i) рассматриваются узлы смешения и

распределения потоков, а трубопроводы между узлами представлены соответствующими ветвями графа (V_j). Без снижения общности подхода параллельные трубопроводы могут быть представлены в графе одной ветвью. Для обеспечения возможности проверки и сведения баланса для всей системы внешние потоки схемы условно заведены в первый узел. Внешние связи в узлах 1, 2 и 4, показанные пунктирными линиями, необходимы при совместном рассмотрении материальных и энергетических балансов в системе.

Рисунок 1. Рассматриваемая энергетическая система: ПН – питательные насосы; ПВД – группа подогревателей высокого давления; Б ПВД – байпас ПВД по питательной воде; К – котел; НПр и ППр – соответственно непрерывная и периодическая продувка котла; ПО – пробоотборные точки; Др+У – дренажи и утечки главных паропроводов (ГПП); ТА – турбоагрегат; РОУ – редукционно-охлаждающие установки свежего пара; КСН – паровой коллектор собственных нужд

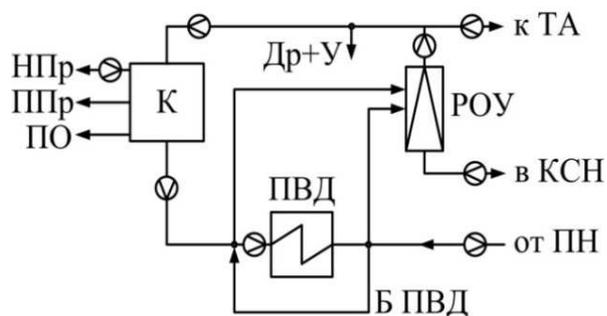
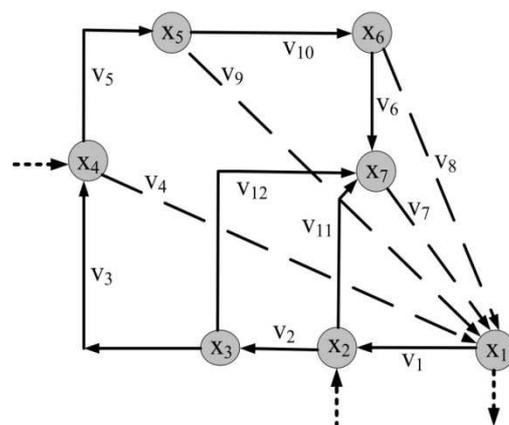


Рисунок 2. Структура графа $G = (X, V)$, соответствующего схеме по рисунку 1: X_1 – объединение внешних потоков системы; X_2 и X_3 – питательная вода соответственно до и после ПВД; X_4 – котел; X_5 – условная точка локализации дренажей и утечек из ГПП; X_6 – отбор пара на РОУ; X_7 – РОУ; V_1 – расход питательной воды от ПН; V_2 – суммарный расход питательной воды через ПВД и Б ПВД; V_3 – расход питательной воды в котел; V_4 – суммарный расход среды с НПр, ППр и ПО; V_5 – расход пара от котла; V_6 и V_7 – расходы пара соответственно по горячей и холодной сторонам РОУ; V_8 – расход пара на турбину; V_9 – расход с дренажами и утечками из ГПП; V_{10} – расход пара от котла за вычетом дренажей и утечек из ГПП; V_{11} и V_{12} – расходы соответственно холодной и горячей питательной воды на впрыск в РОУ



Для модельного описания структуры системы используется матрица инцидентности A графа, которая формируется по следующим правилам. Каждая строка матрицы относится к соответствующему узлу графа X_i , каждый столбец – к ветви графа V_j . Если начало j -й ветви графа размещается в i -м узле, то соответствующий элемент матрицы A равен единице ($a_{ij}=1$). Если конец j -й ветви графа размещается в i -м узле, то соответствующий элемент матрицы A равен минус единице ($a_{ij}=-1$). Для рассматриваемого примера матрица A имеет размер $n \times m$ ($n=7$ – число строк или узлов графа, $m=12$ – число столбцов или ветвей графа). Произведение матрицы A на вектор V дает в каждом элементе матрицы AV небаланс массы в соответствующем узле. Это позволяет сформулировать рассматриваемую некорректную задачу в виде

$$AV + \sigma = 0, \quad (1)$$

где σ – числовой параметр, характеризующий погрешность балансового уравнения.

С использованием математического аппарата регуляризации Тихонова соответствующая (1) оптимизационная задача формулируется следующим образом:

$$- \text{при скалярной постановке } F_c(V, \lambda) = |AV|^2 + \lambda |V - V_0|^2 \Rightarrow \min, \quad (2)$$

$$- \text{при векторной постановке } F_c(V, \lambda) = |AV|^2 + |\lambda(V - V_0)|^2 \Rightarrow \min, \quad (3)$$

где F_c – целевая функция; \mathbf{V}_0 – априорная оценка вектора \mathbf{V} ; λ и λ – малый положительный параметр регуляризации, который необходимо подобрать определенным способом, и диагональная матрица, составленная из таких параметров, соответственно.

Скалярная постановка задачи (2) соответствует известной постановке задачи регуляризации Тихонова, при этом значение параметра регуляризации λ выбирается одинаковым для всех элементов вектора \mathbf{V} . Векторная постановка задачи (3) введена с целью обеспечения возможности учета различной степени достоверности определения отдельных параметров априорной информации (различных метрологических характеристик средств измерения или их исправности; точности экспертных оценок). При этом число параметров регуляризации, составляющих матрицу λ , совпадает с числом параметров априорной информации. Важно отметить, что первое слагаемое в целевой функции (2) или (3) характеризует модуль вектора невязки балансов по всем узлам $\Delta = |\mathbf{A}\mathbf{V}|$, а второе слагаемое – модуль вектора отклонения полученного решения от исходного вектора $\Delta\mathbf{V} = |\mathbf{V} - \mathbf{V}_0|$.

Аналитические решения для задач (2) и (3) получены в виде (решение задачи (2) известно из теории регуляризации Тихонова; решение задачи (3) получено автором путем дифференцирования (3) по искомым параметрам и приравнивания производной нулю):

$$- \text{при скалярной постановке } \mathbf{V} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \lambda \mathbf{V}_0, \quad (4)$$

$$- \text{при векторной постановке } \mathbf{V} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \lambda^2 \mathbf{V}_0, \quad (5)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица, верхние индексы «Т» и «-1» соответствуют операциям транспонирования и обращения матриц.

Решения (4) и (5) не учитывают метрологические и технологические ограничения, которые для любой постановки задачи (2) или (3) формулируются следующим образом:

$$V_i \in [V_i^{\min}; V_i^{\max}], \quad (6)$$

$$\Delta G_j \in [0; \Delta G_j^{\max}], \quad (7)$$

где V_i^{\min} и V_i^{\max} – границы доверительного интервала существования действительного значения параметра, обусловленные номинальной погрешностью исправного средства измерения (или экспертной оценки) в i -ой ветви; ΔG_j^{\max} – предельно допустимый небаланс массы в j -ом узле, обусловленный погрешностями средств измерений в пределах номинальных метрологических характеристик системы мониторинга.

Для численного решения задачи (2) или (3) с учетом ограничений (6), (7) использованы алгоритмы статистического программирования: выполняется многократная генерация случайным образом вектора расходов \mathbf{V} вокруг априорных значений его элементов в заданном метрологическими ограничениями (6) диапазоне, что автоматически приводит к выполнению метрологических ограничений; сгенерированное решение проверяется на выполнение технологических ограничений (7) в заданных узлах; при выполнении всех ограничений полученные варианты решения сравниваются по значению целевой функции, и из этих вариантов выбирается оптимальный, которому соответствует минимальное значение целевой функции (2) или (3). Если решение, удовлетворяющее заданным ограничениям, не найдено, следует признать наличие неисправности приборов или выхода их за границы номинальных метрологических характеристик. Задача локализации источника ошибки решается при этом поиском узлов с максимальными небалансами массы и соответствующих им ветвей.

Предложенная методика обобщена на случай совместного сведения материальных и энергетических балансов в системе.

Выделяем два вида потоков энергии: внутренний и внешний. Потоки, связанные с потоками теплоносителя внутри системы, считаются внутренними. Потоки энергии, передаваемые теплоносителям в систему извне (например, в котле или в ПВД для рассматрива-

емой на рисунке 1 схемы), считаются для нее внешними. Формулировка исходной некорректной задачи (1) дополняется уравнением

$$\mathbf{A}\mathbf{H} + \sigma_3 = \mathbf{B}, \quad (8)$$

где $\mathbf{H} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{h}$ – вектор потоков энергии, \mathbf{h} – вектор энтальпий (точка перед знаком умножения показывает почленное умножение соответствующих элементов двух векторов); σ_3 – числовой параметр, характеризующий погрешность уравнения баланса энергии; \mathbf{B} – матрица-столбец, учитывающая внешние для системы потоки энергии.

Оптимизационная задача в данном случае является задачей многокритериальной оптимизации и предусматривает минимизацию двух функций цели; при этом исходные формулировки по материальным потокам (2) или (3) дополняются соответствующим уравнением:

$$- \text{при скалярной постановке } F_{c_3}(\mathbf{H}, \lambda_3) = |\mathbf{A}\mathbf{H} - \mathbf{B}|^2 + \lambda_3 |\mathbf{H} - \mathbf{H}_0|^2 \Rightarrow \min, \quad (9)$$

$$- \text{при векторной постановке } F_{c_3}(\mathbf{H}, \lambda_3) = |\mathbf{A}\mathbf{H} - \mathbf{B}|^2 + |\lambda_3(\mathbf{H} - \mathbf{H}_0)|^2 \Rightarrow \min, \quad (10)$$

где \mathbf{H}_0 – априорная оценка вектора \mathbf{H} ; λ_3 и λ_3 – малый положительный параметр регуляризации по потокам энергии и диагональная матрица, составленная из таких параметров, соответственно; $|\mathbf{A}\mathbf{H} - \mathbf{B}| = \Delta E$ – суммарная невязка балансов энергии по всем узлам.

Для полученной системы, в дополнение к ограничениям (6), (7), вводятся аналогичные ограничения по энергии:

$$h_i \in [h_i^{\min}; h_i^{\max}], \quad (11)$$

$$\Delta E_j \in [0; \Delta E_j^{\max}], \quad (12)$$

где h_i^{\min} и h_i^{\max} – границы доверительных интервалов существования действительных значений энтальпии, обусловленные номинальными погрешностями средств измерения давления и температуры теплоносителей в i -ой ветви; ΔE_j^{\max} – предельно допустимый небаланс энергии в j -ом узле, обусловленный погрешностями средств измерений в пределах номинальных метрологических характеристик системы мониторинга.

Для учета различной степени достоверности определения отдельных параметров априорной информации оптимизационная задача по совместному сведению материальных и энергетических балансов в системе формулируется в виде системы, составленной из выражений (3), (6), (7), (10), (11) и (12). Для численного решения задачи используются алгоритмы статистического программирования. При этом рассмотрены варианты замены двух критериев одним интегральным (аддитивным или мультипликативным), а также нахождение оптимального решения по Парето.

При тестировании различных вариантов постановки и решения сформулированных задач с использованием фактических данных по Омской ТЭЦ-4 выявлено следующее:

1) задача № 1 в скалярной постановке (2) и её аналитическое решение (4) позволяют найти искомый вектор значений расходов теплоносителей по схеме, но не позволяет учитывать метрологические и технологические ограничения;

2) задача № 1 в скалярной постановке (2) и её численное решение позволяют учесть метрологические и технологические ограничения, но не учитывает различную степень достоверности определения результатов измерения отдельных параметров, то есть различия в метрологических характеристиках работающих в составе системы мониторинга средств измерения;

3) задачи № 1 и № 2 в векторной постановке (3) и совместно (3) и (10) и их численное решение позволяют получить решение с учетом метрологических и технологических ограничений, а также учесть различную степень достоверности определения результатов измерения отдельных параметров. Этот вариант рекомендуется для практической реализации в программно-технических комплексах ТЭС;

4) использование при решении задачи № 2 метода замены двух критериев оптимизации аддитивным и мультипликативным критерием приводит к частным решениям, принадлежащим множеству Парето; при этом существенное влияние на результат решения оказывает выбор весовых коэффициентов для каждого из критериев оптимизации;

5) решение с использованием множества Парето удобно использовать, если требуется найти ответ на вопрос, обусловлены ли наблюдаемые небалансы массы и энергии в системе номинальными метрологическими характеристиками средств измерения, и нет необходимости в нахождении регуляризованных значений расходов теплоносителя и энергии по тепловой схеме; для нахождения последних следует пользоваться методом замены двух критериев оптимизации аддитивным и мультипликативным критерием.

Предложенные методы сведения балансов в энергетических системах реализованы в виде программного модуля «Баланс».

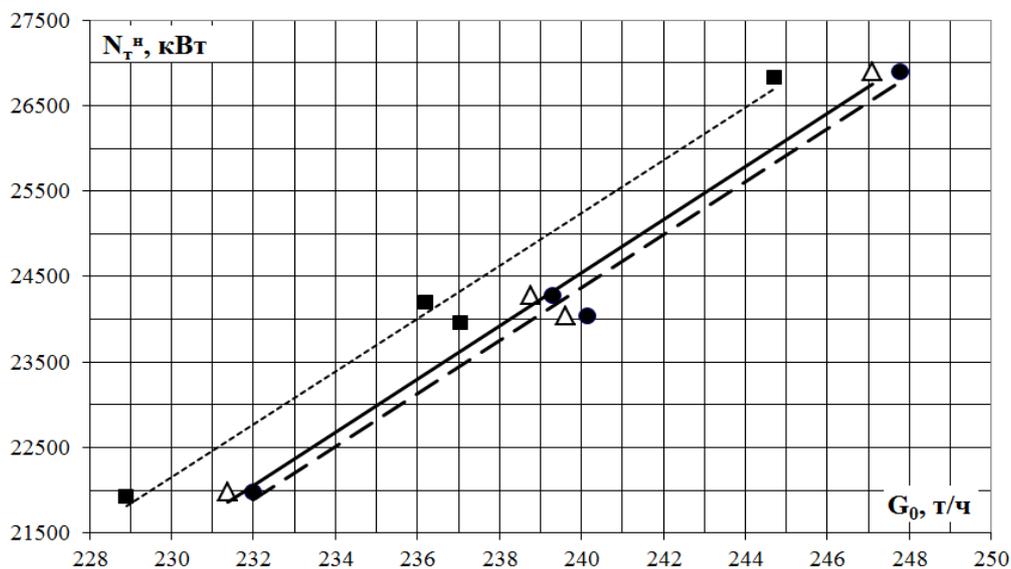
Третья глава посвящена вопросам практического применения разработанной методики сведения материальных балансов при обработке результатов гарантийных тепловых испытаний паротурбинной установки.

Объектом испытаний являлся турбоагрегат ПТ-26/29-2,9/1,3 Кизеловской ГРЭС, имеющий регулируемые производственный и теплофикационный (одноступенчатый) отборы пара. Испытания проведены с целью экспериментального подтверждения гарантий завода-изготовителя по номинальной электрической мощности после модернизации системы регулирования с увеличением номинального расхода пара в производственный отбор. Методика и метрологическое обеспечение испытаний разработаны с учетом рекомендаций руководящих документов энергетической отрасли и соответствовали требованиям к испытаниям по первой категории сложности. Выполнены следующие этапы: 1) разработаны программа и метрологическое обеспечение испытаний; 2) проведены предварительные опыты для проверки готовности оборудования, тепловой схемы и схемы измерений к испытаниям; 3) проведены основные опыты в соответствии с программой испытаний; 4) выполнена предварительная обработка результатов испытаний с определением окончательных результатов измерения параметров в опытах; 5) рассчитаны фактические значения измеренных параметров теплоносителей в характерных точках установки, результаты приведены к номинальным условиям. При этом в соответствии с задачами диссертации в рамках выполнения работ по этапу 4 рассмотрены следующие альтернативные варианты сведения материального баланса по турбоустановке: вариант № 1 – отнесение невязки баланса к расходу свежего пара (что соответствует требованиям действующих руководящих документов, регламентирующих проведение тепловых испытаний паровых турбин ТЭС и АЭС); вариант № 2 – отнесение невязки баланса к расходу турбинного конденсата; вариант № 3 – сведение материального баланса с использованием предложенной в главе 2 диссертации методики. Результаты вариантных расчетов отражены на рисунке 3.

Из полученных данных следует, что от выбора метода сведения материального баланса значимо зависят показатели тепловой экономичности турбоагрегата: в данном случае при номинальном расходе свежего пара $G_0^H = 237,5$ т/ч искомая номинальная электрическая мощность составила для вариантов № 1, 2 и 3 соответственно 23590, 24480 и 23770 кВт, то есть варьируется с относительным отклонением 3,7 %; относительное отклонение N_T^H , определенной при использовании предложенной методики сведения материального баланса (с учетом реальных метрологических характеристик приборов контроля), от N_T^H , рассчитанной в соответствии с требованиями руководящего документа, составляет 0,8 %. Гарантированная заводом-изготовителем номинальная электрическая мощность турбоагрегата при фактической тепловой схеме его работы (при подаче в деаэратор питательной воды греющего пара из производственного отбора турбины) равна 23890 кВт. Нормируемая погрешность определения электрической мощности в испытаниях, обусловлен-

ная метрологическими характеристиками используемых приборов контроля, в данном случае составила 0,7 %. При выполнении обработки результатов испытаний в соответствии с требованиями руководящего документа (по варианту № 1) должен быть сделан вывод о том, что фактическая мощность при номинальных условиях меньше гарантированной заводом-изготовителем на 1,3 %, что превосходит погрешность испытаний, а при обработке результатов испытаний с использованием предложенной методики сведения материального баланса (по варианту № 3) это отклонение составляет 0,5 %, что может быть признано обусловленным погрешностью испытаний.

Рисунок 3. Результаты расчета электрической мощности N_T^H , приведенной к номинальным условиям, в опытах в зависимости от расхода свежего пара G_0 : точки – результаты расчета в опытах; ● и штриховая линия – расчет по варианту № 1; ■ и пунктирная линия – расчет по варианту № 2; Δ и сплошная линия – расчет по варианту № 3



Таким образом, в конкретных случаях использование регламентированной руководящим документом упрощенной методики сведения материального баланса может оказаться критичным с точки зрения признания турбоагрегата соответствующим заявленным заводом-изготовителем характеристикам.

Четвертая глава посвящена расчетным исследованиям по оценке изменения фактических и номинальных значений ТЭП оборудования и значений резерва тепловой экономичности при использовании разработанной методики сведения балансов в расчете показателей тепловой экономичности действующих ТЭС различного типа: паротурбинной ТЭЦ неблочного типа (на примере Омской ТЭЦ-4, г. Омск) и парогазовой ТЭС (на примере ПГУ-ТЭС «Международная», г. Москва).

На Омской ТЭЦ-4 в практику ежемесячных расчетов ТЭП внедрена методика совместного сведения материальных и энергетических балансов по данным технического учета, разработанная для участка тепловой схемы, аналогичного показанному на рисунке 1 (от расходомеров питательной воды за питательными насосами до расходомеров свежего пара турбоагрегатов. В составе ТЭЦ работают турбоагрегаты Р-50-130 (2 агрегата), ПТ-135/165-130/13, Р-100-130 и Т-100-130 (2 агрегата), а также энергетические котлы БКЗ-320-140 (3 котла) и БКЗ-420-140 (6 котлов); в восьми котлах сжигается каменный уголь, один из котлов БКЗ-420-140 переведен на сжигание природного газа.

В таблице 1 приведены результаты вариантных расчетов ТЭП, а также величина резерва тепловой экономичности (выраженная в суммарном перерасходе или экономии топлива) за один из месяцев. В каждом из вариантов расчета в полном объеме выполнены требования нормативных документов в части сведения теплового, топливного и электрического балансов ТЭЦ. Однако каждый раз использованы разные исходные значения рассматриваемых основных потоков теплоносителя, полученные при сведении балансов при различных изложенных в главе 2 диссертации постановках оптимизационной задачи: вариант № 1 – при отсутствии сведения балансов; варианты №2, 3 и 4 – при сведении толь-

ко материальных балансов (вариант № 2 – аналитическое решение (4) при скалярной постановке задачи (2); вариант № 3 – численное решение при скалярной постановке задачи (2); вариант № 4 – численное решение при векторной постановке задачи (3) с учетом ограничений (6), (7)); варианты № 5 и 6 – при совместном сведении материальных и энергетических балансов при векторной постановке задачи (3), (10) с учетом ограничений (6), (7), (11), (12) (вариант № 5 – с использованием аддитивного критерия оптимизации при равных весовых коэффициентах критериев; вариант № 6 – с использованием мультипликативного критерия оптимизации при равных весовых коэффициентах критериев).

Таблица 1. Результаты расчета ТЭП работы оборудования ТЭЦ при различных вариантах определения исходных значений расходов теплоносителей по тепловой схеме

Показатель, единица измерения	Значение показателя при разных вариантах сведения балансов					
	1	2	3	4	5	6
$b_3^{(\Phi)}$, г у.т./кВт.ч	360,5	360,5	360,5	360,5	360,4	360,5
$b_3^{(HP)}$, г у.т./кВт.ч	355,1	357,8	359,8	358,9	357,3	357,4
$b_{TЭ}^{(\Phi)}$, кг у.т./ГДж	43,80	43,80	43,80	43,80	43,83	43,80
$b_{TЭ}^{(HP)}$, кг у.т./ГДж	43,57	43,61	43,80	43,73	43,71	43,71
ΔB , т у.т.	1054	610	117	324	570	545

Из полученных данных видно, что фактические значения удельных расходов топлива на отпуск электрической энергии ($b_3^{(\Phi)}$) и тепловой энергии ($b_{TЭ}^{(\Phi)}$) практически не зависят от применяемой методики сведения материального баланса, поскольку суммарный расход сожженного топлива, отпуск тепловой и электрической энергии являются данными коммерческого учета, то есть характеризуются высокой степенью достоверности. Но нормативные значения удельных расходов топлива ($b_3^{(HP)}$) и ($b_{TЭ}^{(HP)}$), зависящие от фактических нагрузок каждого агрегата и, следовательно, от способа сведения балансов, изменяются в большей степени. Соответственно и итоговая величина перерасхода топлива ΔB отличается для некоторых вариантов практически на порядок. Очевидно, наиболее представительными следует считать результаты расчетов, полученные при совместном сведении материальных и энергетических балансов.

Результаты аналогичных расчетов, выполненных за каждый из месяцев базового года, показали, что при различных вариантах сведения балансов значения номинального количества сожженного топлива по ТЭЦ за период отличаются друг от друга на величину, сопоставимую с утвержденным нормативно-технической документацией по топливоиспользованию резервом тепловой экономичности.

Предложенная методика сведения балансов для рассматриваемого участка тепловой схемы по варианту № 5 использована на Омской ТЭЦ-4 при разработке программного комплекса «ТЭС-Эксперт», предназначенного для расчета фактических и номинальных значений показателей тепловой экономичности оборудования и составляющих резерва тепловой экономичности, а также для оптимизации загрузки оборудования. Использование методики сведения балансов по варианту № 5 обеспечивает (рисунок 4) существенно более полное совпадение значений резерва тепловой экономичности, рассчитанных по прямому и обратному (по сумме составляющих) балансам, чем при отсутствии сведения балансов (вариант № 1): в среднем за год отклонение составило 1,9 % при изменении его по месяцам от –4,3 до 3,5 %. При отсутствии сведения балансов это отклонение составляет в среднем за год 10,9 % с отклонениями по месяцам от –100,3 до 46,7 %.

Реализация результатов работы на Омской ТЭЦ-4 подтверждена актом внедрения.

Другим объектом реализации результатов работы является ПГУ-ТЭС «Международная», состоящая из двух энергоблоков ПГУ-110 и ПГУ-116. В состав каждого энергоблока входит две газотурбинные установки, два двухконтурных котла-утилизатора без дожигания

топлива, одна противодавленческая паровая турбина двух давлений с утилизацией пара в сетевых подогревателях и один пиковый водогрейный котел. Работа энергоблоков по электрическому графику нагрузок обеспечивается суховоздушными градирнями, в которых осуществляется отвод избыточной теплоты от потока сетевой воды.

Разработанный программный модуль «Баланс» внедрен в производственный процесс ПГУ-ТЭС «Между-

народная» и используются при ежесуточном контроле состояния системы технического учета (путем оценки невязок материальных балансов по отдельным узлам тепловой схемы и анализа динамики их изменения во времени), а также при ежемесячных расчетах показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС в рамках подготовки государственной статистической отчетности (путем совместного сведения материальных и тепловых балансов, сведения топливного и электрического балансов с расчетом фактических и номинальных значений технико-экономических показателей). В данном случае предложенная методика совместного сведения материальных и энергетических балансов реализована (задача в векторной постановке (3), (10) с учетом ограничений (6), (7), (11), (12)) применительно к двум основным трактам энергоблоков: пароводяному тракту паротурбинной части ТЭС, а также технологической схеме подогрева сетевой воды. Дополнительно разработана методика сведения материальных и энергетических балансов по каждой из газотурбинных установок, обеспечивающая определение балансовых значений расхода воздуха на компрессор, расхода топлива в камеру сгорания, расхода дымовых газов за турбиной, теплофизических параметров указанных теплоносителей, электрической мощности установки, а также потерь тепловой энергии по установке. Программный модуль прошел тестирование по обоим энергоблокам ТЭС в течение года. В таблице 2 приведен пример результатов расчета за один из месяцев фактически отработанного периода по энергоблоку № 1 (газотурбинные установки ГТ-1, 2; котлы-утилизаторы КУ-1, 2; паровая турбина ПТ-3). Верхние значения в строках таблицы соответствуют ГТ-1 или КУ-1, нижние – ГТ-2 или КУ-2; единственные значения в строках относятся к ПТ-3 или в целом к ПГУ-1. На рисунке 5 приведены в сопоставлении результаты расчета фактических и номинальных значений основных ТЭП оборудования ТЭС в целом по месяцам анализируемого года.

Из полученных данных следует, что сведение балансов по данным технического учета слабо влияет на фактические и номинальные значения удельных расходов условного топлива, поскольку при расчете фактических значений используются только данные коммерческого учета количества сожженного топлива, отпуска электрической и тепловой энергии, а на результат расчета номинального количества сожженного топлива для ПГУ без дожигания топлива в котлах-утилизаторах влияют лишь показатели ГТУ. Однако промежуточные показатели тепловой экономичности агрегатов без проведения работы по сведению балансов оказываются существенно искаженными и неувязанными между собой, что подтверждается соотношением между фактическими значениями показателей, опре-

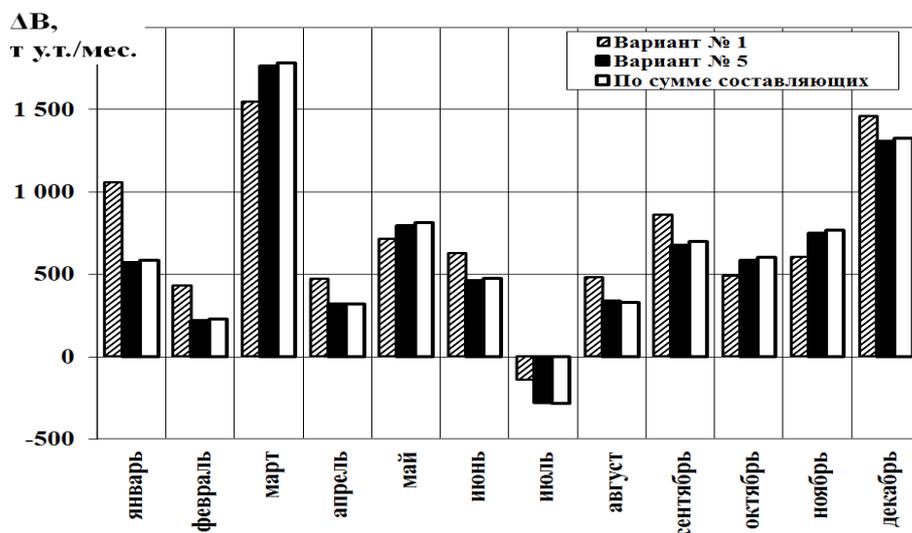


Рисунок 4. Результаты расчета резерва тепловой экономичности ΔB Омской ТЭС-4 по месяцам года

деленных по прямому и обратному балансам без сведения материальных и тепловых балансов по данным рисунка 5. При реализации предложенного метода сведения балансов этот недостаток устраняется, кроме того, при этом обеспечивается существенно более полное соответствие номинальных значений показателей и фактических значений, рассчитанных по обратному балансу, что позволяет оценить качество нормативно-технической документации ТЭС по топливоиспользованию.

Таблица 2. Основные показатели работы оборудования ПГУ-ТЭС при расчете без сведения балансов («Б-») и со сведением балансов («Б+») за один из месяцев

Наименование показателя, единица измерения	Фактическое значение (Ф)		Отклонение (Ф) _{Б+} от (Ф) _{Б-} , %	Номинальное значение (Н)		Отклонение (Н) от (Ф), %*	
	Б-	Б+		Б-	Б+	Б-	Б+
КПД брутто ГТУ, %:							
– при расчете по прямому балансу	35,02	35,02	0,0	35,35	35,35	0,3*	0,3*
– при расчете по обратному балансу	31,94	35,02	9,6	35,35	35,35	3,4*	0,3*
– отклонение	3,1*	0,0*	-	0,0*	0,0*	-	-
Невязка материального баланса контуров КУ, %:							
– контура низкого давления	1,57	0,24	-1,3*	-	-	-	-
– контура высокого давления	1,63	0,62	-1,0*	-	-	-	-
	2,98	0,27	-2,7*	-	-	-	-
	4,76	0,42	-4,3*	-	-	-	-
КПД брутто КУ, %:							
– при расчете по прямому балансу	78,73	78,59	-0,2	78,64	78,64	-0,1*	0,0*
– при расчете по обратному балансу	69,03	79,83	15,6	80,11	80,11	11,1*	0,3*
– отклонение	11,8*	0,1*	-	0,0*	0,0*	-	-
Расход пара на ПТ, т/ч:							
– контура высокого давления	98,9	105,8	6,9	104,1	105,1	5,3	-0,6
– контура низкого давления	22,3	25,8	15,5	25,5	25,5	14,4	-1,2
Удельный расход теплоты брутто на выработку электроэнергии ПТ, кДж/(кВт·ч)	8516	9860	15,8	9881	9881	16,1	0,3
$b_{\text{г}}^{(\Phi)}$, г у.т./кВт·ч	208,0	207,8	-0,1	204,6	204,6	-1,6	-1,5
$b_{\text{тэ}}^{(\Phi)}$, кг у.т./ГДж	34,78	34,82	0,2	34,87	34,82	0,3	0,0
ΔB , т у.т.	72	83	14,6	-	-	-	-

Примечание: знаком «» отмечены абсолютные отклонения в процентах

Практическое использование результатов работы на ТЭС «Международная» подтверждено актом внедрения. Экономическая эффективность внедрения программного модуля обусловлена повышением точности прогнозирования технико-экономических показателей ТЭС при формировании заявок на оптовом рынке электроэнергии и мощности, возможностью оперативного обнаружения неисправностей в работе элементов системы мониторинга показателей работы оборудования, а также выявленными резервами тепловой экономичности. Экономия топлива, обусловленная внедрением программного модуля, оценена специалистами ТЭС на уровне 1308 тонн в год в условном исчислении (эффект соответствует

сумме устранимых составляющих резерва тепловой экономичности, обнаруженных в ходе расчетов показателей работы оборудования по месяцам рассматриваемого года).

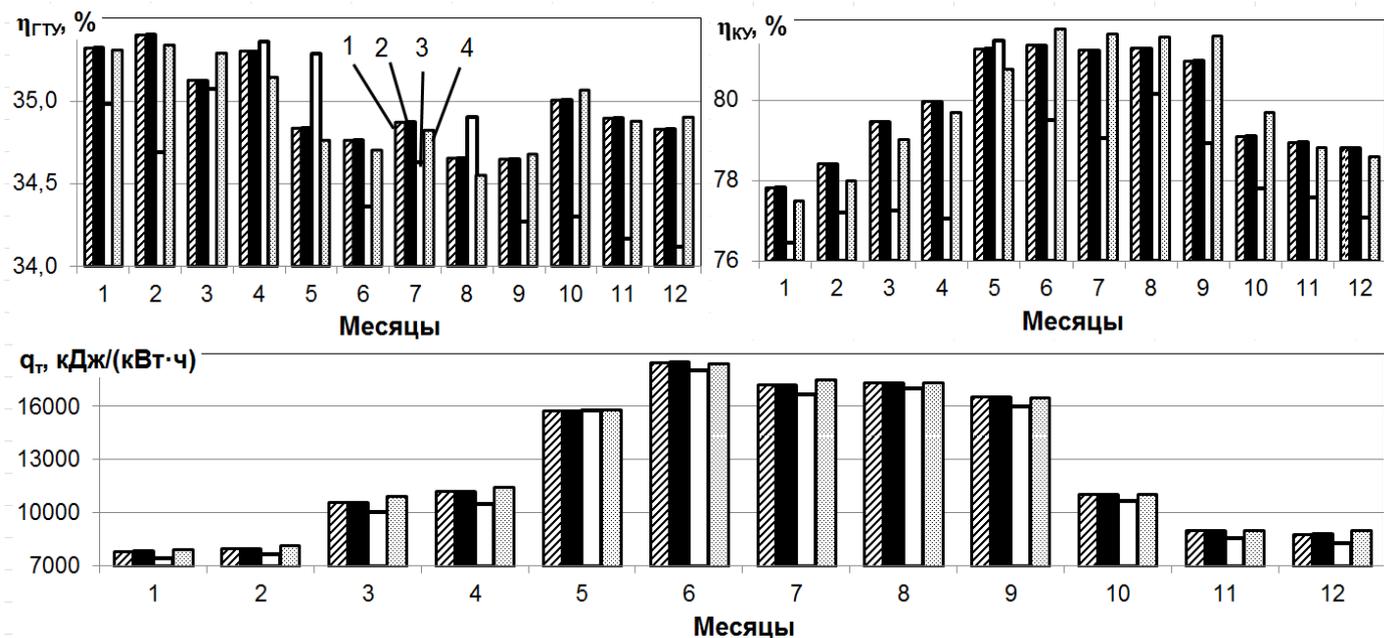


Рисунок 5. Основные показатели работы оборудования ПГУ-ТЭС при расчете без сведения балансов и со сведениям балансов по месяцам года: $\eta_{ГТУ}$ и $\eta_{КУ}$, % – КПД брутто соответственно по группе газотурбинных установок и по группе котлов-утилизаторов; q_t , кДж/(кВт·ч) – удельный расход теплоты брутто на выработку электроэнергии по группе паровых турбин; 1 – фактическое значение, рассчитанное по прямому балансу; 2 – фактическое значение, рассчитанное по обратному балансу после совместного сведения материальных и тепловых балансов; 3 – фактическое значение, рассчитанное по обратному балансу без сведения материальных и тепловых балансов; 4 – номинальное значение

Результаты работы используются также в ИГЭУ при подготовке магистров по профилю «Тепловые электрические станции» и при повышении квалификации персонала ТЭС на базе Института повышения квалификации и переподготовки кадров (в энергетике) при ИГЭУ по программе «Расчеты фактических, номинальных, нормативных ТЭП и составляющих резерва тепловой экономичности. Оптимизация режимов работы оборудования ТЭС». Реализация результатов работы подтверждена актом внедрения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведен комплекс расчетных и экспериментальных исследований, направленных на совершенствование оценки показателей качества агрегатов ТЭС при проведении тепловых испытаний и расчете показателей тепловой экономичности путем разработки и реализации методик сведения материальных и энергетических балансов в энергетических системах по результатам измерения параметров потоков теплоносителей.

2. На основе матричной модели материальных потоков в энергетических системах и подхода к решению некорректных задач на основе регуляризации Тихонова сформулирована задача оценки соответствия рассчитываемых по данным технического учета невязок материального баланса нормативным метрологическим характеристикам используемых средств измерения с локализацией источника ошибки, получены аналитические и численные решения задачи. Предложенный подход обобщен на методику совместного сведения материальных и энергетических балансов в тепловой схеме ТЭС по данным технического учета, позволяющую учесть различную степень достоверности определения параметров исходной информации, метрологические и технологические ограничения по всем или некоторым выбранным узлам схемы. Разработанная методика реализована в про-

граммном модуле «Баланс», ориентированном на решение прикладных задач обработки результатов тепловых испытаний и расчета показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС.

3. Разработанная методика сведения материальных балансов по результатам измерений параметров потоков теплоносителей в тепловой схеме использована при обработке результатов проведенных гарантийных тепловых испытаний турбоагрегата ПТ-26/29-2,9/1,3 Кизеловской ГРЭС. По результатам вариантных расчетов показано, что от выбора методики сведения балансов зависит признание турбоагрегата соответствующим гарантированным заводом-изготовителем показателям.

4. Проведены расчетные исследования по оценке изменения фактических и номинальных значений показателей тепловой экономичности оборудования и значений резерва тепловой экономичности при использовании разработанной методики сведения балансов в расчете показателей тепловой экономичности действующих ТЭС различного типа. По результатам исследований выявлено следующее:

– применительно к паротурбинной ТЭС с поперечными связями методика сведения балансов оказывает наибольшее влияние на результаты расчета номинальных значений удельных расходов топлива на отпуск тепловой и электрической энергии; при использовании различных методик сведения балансов значения номинального количества сожженного топлива по ТЭС за отчетный период отличаются друг от друга на величину, сопоставимую с утвержденным нормативно-технической документацией по топливоиспользованию резервом тепловой экономичности электростанции;

– для парогазовой ТЭС без дожигания топлива в котлах-утилизаторах методика сведения балансов не оказывает значимого влияния на результаты расчета фактических и номинальных значений удельных расходов топлива на отпуск тепловой и электрической энергии, но существенно влияет на результаты расчета промежуточных показателей тепловой экономичности отдельных агрегатов.

5. Программный модуль «Баланс» внедрен в производственный процесс ПГУ-ТЭС «Международная» ООО «Ситиэнерго» (г. Москва), где используется при ежедневном контроле системы технического учета (путем оценки невязок материальных балансов по отдельным узлам тепловой схемы и анализа динамики их изменения во времени), а также при ежемесячных расчетах показателей тепловой экономичности оборудования в рамках подготовки государственной статистической отчетности (путем совместного сведения материальных и тепловых балансов, сведения топливного и электрического балансов с расчетом фактических и номинальных значений технико-экономических показателей). Экономический эффект от внедрения методики обусловлен выявленным резервом тепловой экономичности в количестве 1308 т у.т./ год.

6. Предложенная методика совместного сведения материальных и энергетических балансов использована на Омской ТЭЦ-4 при разработке программного комплекса «ТЭС-Эксперт», предназначенного для расчета фактических и номинальных значений показателей тепловой экономичности оборудования и составляющих резерва тепловой экономичности, а также для оптимизации загрузки оборудования. Использование методики сведения балансов обеспечило повышение объективности результатов расчета составляющих резерва тепловой экономичности оборудования, что подтверждается удовлетворительным совпадением значений резерва тепловой экономичности ТЭЦ, рассчитанных по прямому и обратному балансам.

7. Основные полученные в работе результаты внедрены в Ивановском государственном энергетическом университете (ИГЭУ) при подготовке магистров по профилю «Тепловые электрические станции», а также при повышении квалификации работников производственно-технических отделов ТЭС на базе Института повышения квалификации и пе-

реподготовки кадров (в энергетике) при ИГЭУ по программе «Расчеты фактических, номинальных, нормативных ТЭП и составляющих резерва тепловой экономичности. Оптимизация режимов работы оборудования ТЭС».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Ледуховский, Г.В. Решение задачи регуляризации материальных потоков в сложных энергетических системах / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, **А.П. Зимин** // Вестник ИГЭУ, 2013, вып. 2. с. 5-9.
2. Ледуховский, Г.В. Векторная регуляризация материальных потоков в энергетических системах сложной структуры / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, **А.П. Зимин** // Вестник ИГЭУ, 2013, вып. 4. с. 5-11.
3. Ледуховский, Г.В. Задача многокритериальной регуляризации потоков энергии и теплоносителя в энергетических системах сложной структуры / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, **А.П. Зимин** // Вестник ИГЭУ, 2013, вып. 6. с. 5-10.
4. Ледуховский, Г.В. Алгоритмы сведения материальных и энергетических балансов при расчетах технико-экономических показателей оборудования ТЭС на основе метода регуляризации некорректны задач / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, **А.П. Зимин**, А.А. Разинков // Теплоэнергетика, 2015, № 8, с. 72-80.
5. **Зимин, А.П.** Разработка методики совместного сведения материальных и энергетических балансов по данным технического учета в системе расчета показателей тепловой экономичности оборудования ПГУ-ТЭС / **А.П. Зимин**, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, С.Д. Горшенин, В.А. Буданов, А.Е. Барочкин // Вестник ИГЭУ, 2017, вып. 2. с. 5-12.

Тезисы и полные тексты докладов конференций

6. **Зимин, А.П.** Тепловые испытания турбины ПТ-26-2,9 КТЗ для проверки гарантий завода-изготовителя / **А.П. Зимин**, Г.В. Ледуховский // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Девятнадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4-х т. Т. 4 – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 334 с. С. 127.
7. **Зимин, А.П.** Гарантийные тепловые испытания паровой турбины после модернизации системы регулирования / **А.П. Зимин**, Г.В. Ледуховский // Теплоэнергетика: Восьмая междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013»: Материалы конференции. В 7 т. Т.1, Ч.1 – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский госунар. энергетический университет им. В.И. Ленина», 2013, – 252 с. С 25-27.
8. Ледуховский, Г.В. Регуляризация данных мониторинга материальных потоков в сложных энергетических системах / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, **А.П. Зимин** // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26: XXVI Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т.9 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2013. –С. 375-377.
9. **Зимин, А.П.** Решение задачи проверки качества технических измерений для систем контроля тепловой экономичности оборудования ТЭС / **А.П. Зимин**, Г.В. Ледуховский // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4-х т. Т. 4 – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – 372 с. С. 121.
10. **Зимин, А.П.** Алгоритм оценки достоверности результатов измерения расходов теплоносителей для программно-технических комплексов ТЭС / **А.П. Зимин**, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков // Теплоэнергетика: Девятая междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»: Материалы конференции. В 7 т. Т.1, Ч.1 – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский госунар. энергетический университет им. В.И. Ленина», 2014, – 230 с. С 22-25.
11. **Зимин, А.П.** Процедура оценки достоверности результатов измерения расходов теплоносителей для программно-технических комплексов ТЭС / **А.П. Зимин**, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин // Сборник материалов докладов Национального конгресса по энергетике, 8–12 сентября 2014 г.: в 5 т. Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. – 496 с. С. 241-249.
12. **Зимин, А.П.** Влияние способа сведения материальных балансов по данным первичного учета на точность показателей тепловой экономичности ТЭС / **А.П. Зимин**, Г.В. Ледуховский // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать первая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4-х т. Т. 4 – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 303 с. С. 56.

13. **Зимин, А.П.** Точность расчета показателей тепловой экономичности ТЭС в зависимости от способа сведения материальных балансов по данным первичного учета / **А.П. Зимин**, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков // Теплоэнергетика: Десятая междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015»: Материалы конференции. В 7 т. Т.1 – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государ. энергетический университет им. В.И. Ленина», 2015, – 208 с. С 30-31.
14. **Зимин, А.П.** О влиянии метода сведения материальных балансов по данным первичного учета на достоверность фактических значений показателей тепловой экономичности ТЭС / **А.П. Зимин**, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XVIII Бенардосовские чтения): междунар. науч.-техн. конф.: 27-29 мая 2015 г.: Материалы конференции. Т. 2 / Под. ред. С.В. Тарарыкина, В.В. Тютикова, В.А. Шуина и др. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государ. энергетический университет им. В.И. Ленина», 2015. – 340 с. С. 3-6.
15. **Зимин, А.П.** О методе сведения материального баланса при обработке опытных данных при испытаниях турбоустановки / **А.П. Зимин**, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков // Теплоэнергетика: Одиннадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016»: Материалы конференции. В 6 т. Т.1 – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государ. энергетический университет им. В.И. Ленина», 2016, – 206 с. С 20-22.
16. **Зимин, А.П.** Сведение материальных и энергетических балансов по данным технического учета в задачах расчета ТЭП ПГУ-ТЭС / **А.П. Зимин**, С.Д. Горшенин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков // Теплоэнергетика: Двенадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017»: Материалы конференции. В 6 т. Т.1 – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государ. энергетический университет им. В.И. Ленина», 2017, – 260 с. С 41-42.
17. **Зимин, А.П.** Реализация алгоритмов совместного сведения материальных и энергетических балансов по данным технического учета в системе расчета показателей тепловой экономичности оборудования ПГУ-ТЭС / **А.П. Зимин**, Г.В. Ледуховский, С.Д. Горшенин // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: Седьмая междунар. науч.-техн. конф.: 21-22 апреля 2017 г.: Сб. науч. тр. Т. 1. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – 329 с. С. 212-217.
18. **Зимин, А.П.** Опыт использования алгоритма совместного сведения материальных и энергетических балансов по данным технического учета при расчете технико-экономических показателей ПГУ-ТЭС / **А.П. Зимин**, Г.В. Ледуховский, В.А. Буданов, С.Д. Горшенин, А.Е. Барочкин // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения): Междунар. науч.-техн. конф.: 31 мая – 2 июня 2017 г.: Материалы конференции. Т 2 / Под. ред. С.В. Тарарыкина, В.В. Тютикова, В.А. Шуина и др. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государ. энергетический университет им. В.И. Ленина», 2017. – 388 с. С. 44-47.

Глава в учебном пособии

19. Ледуховский, Г.В. Расчет номинальных показателей тепловой экономичности ТЭС / Г.В. Ледуховский, А.А. Пospelов, В.С. Арсенов, **А.П. Зимин**, А.А. Разинков // Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС: Учебное пособие / Г.В. Ледуховский, А.А. Пospelов // ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2015. – Гл. 6. – С. 206–399. ISBN 978-5-00062-069-4.

Зимин Артем Павлович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 05.09.2017 г. Формат 60x84¹/₁₆ Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 38

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

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