

На правах рукописи



**Атрошенко Юлиана Константиновна**

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И РАБОЧЕГО  
РЕСУРСА ОСНОВНЫХ АГРЕГАТОВ И СИСТЕМ  
ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ЗА СЧЕТ  
БОЛЕЕ ТОЧНЫХ ОЦЕНОК РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР**

**05.14.14 – Тепловые электрические станции,  
их энергетические системы и агрегаты**

**01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Томск – 2016

Работа выполнена на кафедре автоматизации теплоэнергетических процессов ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

**Научные руководители:** доктор физико-математических наук, доцент  
Стрижак Павел Александрович

кандидат технических наук, доцент  
Озерова Ирина Петровна

**Официальные оппоненты:** Богомолов Александр Романович,  
доктор технических наук, профессор,  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО  
РАН, г. Новосибирск, лаборатория проблем тепло-  
массопереноса, ведущий научный сотрудник

Резник Сергей Васильевич,  
доктор технических наук, профессор,  
Московский государственный технический уни-  
верситет имени Н.Э. Баумана, кафедра «Ракетно-  
космические композитные конструкции», заве-  
дующий кафедрой

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное обра-  
зовательное учреждение высшего образования  
«Самарский государственный технический уни-  
верситет»

Защита состоится «29» сентября 2016 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в аудитории 217 учебного корпуса № 8 по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2803/worklist>.

Автореферат разослан: «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 212.269.13  
кандидат технических наук



А.С. Матвеев

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Несмотря на активное развитие в последние годы атомной энергетики и альтернативных источников энергии, тепловые электрические станции (ТЭС) составляют основу электрогенерации многих государств. Например, в Российской Федерации на ТЭС приходится почти 70 % всей вырабатываемой электрической энергии. Вопросы надежности и продления рабочего ресурса узлов, блоков и агрегатов тепловых электрических станций, предотвращения аварий, повышения эффективности их работы в условиях вынужденного продления времени эксплуатации становятся с каждым годом все более актуальными. Многочисленные опросы и статистические исследования показали, что собственники генерирующих компаний практически не инвестируют средства в техническое перевооружение электростанций и придерживаются стратегии получения краткосрочной прибыли за счет роста цен на электроэнергию. Такой подход привел к тому, что вследствие значительного снижения инвестиций в последние 25–30 лет в обновление оборудования выработка ресурса более половины основных агрегатов, узлов и блоков ТЭС составляет 30 лет и более.

Проблема надежности и безопасности работы оборудования ТЭС носит системный характер и требует комплексного подхода к вопросам повышения рабочего ресурса. В этом направлении важна организация эксплуатации, характеризующаяся, в первую очередь, объективным контролем режимов и параметров устойчивой (надежной) работы основного тепломеханического оборудования ТЭС. Известно, что при работе блоков, агрегатов и узлов ТЭС повреждениям наиболее подвержены водяные экономайзеры, пароперегреватели, топочные экраны и др. В частности, статистический анализ отчетов многих компаний в области электрогенерации показывает, что доля отказов поверхностей нагрева (экономайзеры, испарительные экраны, пароперегреватель, необогреваемые трубы и др.) достигает чрезвычайно большой величины – 76–80 % от общего числа. К примеру, для арматуры – 4–5 %, технических средств автоматизации – 7–8 %, вспомогательного оборудования ТЭС – 3–4 %, а для системы топливоподдачи, газопроводов, регенеративных воздухоподогревателей – менее 1 %. В большинстве случаев выход из строя поверхностей нагрева связан с температурным режимом эксплуатации, в частности, нерегламентированными отклонениями (превышениями). Причем наиболее

опасными являются отклонения длительного характера, которые обусловлены в основном одной причиной – недостоверными измерениями температуры системами контроля, тепловых защит и блокировок ТЭС.

Связь температурного режима эксплуатации с надежностью работы оборудования может быть определена на основе изучения нормативных документов. Анализ последних показывает, что изменение температуры работы, например, коллекторов парового котла ТЭС на 20–30 К относительно номинальных, приводит к снижению их паркового ресурса на 15–20 %, а в некоторых случаях – на 25–35 %. Для энергетического сектора с учетом ограниченных инвестиций в модернизацию оборудования такие масштабы снижения рабочего ресурса являются чрезвычайно проблемными.

Доля измерений температуры в системах контроля и управления ТЭС составляет не менее 30 % от общего числа измеряемых и регулируемых параметров, а в отдельных случаях этот показатель может достигать 40–50 %. Наиболее широко используемыми датчиками в системах контроля и управления технологическими процессами на ТЭС являются термоэлектрические преобразователи (ТЭП). Одной из основных причин погрешностей измерений ТЭП на ТЭС является неидеальный контакт спая термопары с материалом (поверхности агрегатов, блоков и узлов) или средой (вода, конденсат, масла, смазки, газ, пар, двухфазные потоки и др.), температура которых измеряется. «Плохой» контакт может быть следствием влияния многих факторов, в том числе: несоответствия размеров спая термопары и углубления, в котором она размещается; ввода в пространство между спаем и материалом специальных веществ (с целью заполнения зазора); использования защитных покрытий или гильз (для предотвращения образования оксидных пленок на поверхности спая) и др. Исследования влияния этих факторов на условия и характеристики процессов измерений проводились ранее. Можно выделить труды Визгалова С.В., Ибраева А.М., Шарипова И.И., Су Цзюнь, Кочан О.В., Йоцова В.С., Боровковой Т.В., Товстонога В.А., Елисеева В.Н., Лопухова И.И., Чернова В.А., Соловова А.А., Кузнецова Г.В., Мухаммадеева К.М., Рычкова А.Д., Зарко В.Е., Личейкина В.Д., Кофанова А.В., Приймака С.В., Олейникова П.П., Усачева В.Б., Козаченко К.С., Васильевой Н.Л., Резника С.В., Анучина С.А., Просунцова П.В., Шуляковского А.В., Анатычук Л.И., Боднарука В.И. и др. Но задачи оценки влияния неидеальности контакта спая

ТЭП с материалом на погрешности измерений температуры в условиях, соответствующих работе блоков и агрегатов ТЭС, не решены, отсутствуют заключения о том, как эти факторы влияют на надежность работы последних.

**Целью работы** является разработка нового подхода к повышению надежности, безопасности и рабочего ресурса систем, установок и агрегатов ТЭС за счет увеличения точности измерения температур и снижения инерционности реакции систем управления и тепловых защит.

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

1. Анализ возможных диапазонов изменения рабочих температур, характерных для систем и агрегатов, связанных единым технологическим циклом производства тепла и электроэнергии на тепловых электростанциях.
2. Разработка нового подхода к оценке основных погрешностей измерений температуры в блоках, агрегатах и узлах ТЭС с использованием группы моделей теплопереноса и методов численного моделирования.
3. Создание физических и математических моделей процессов теплопереноса в системах «чувствительный элемент ТЭП – объект измерения» и «чувствительный элемент ТЭП – защитная гильза».
4. Численное исследование влияния группы факторов (теплофизические характеристики материалов основных элементов ТЭП, условия теплового контакта с внешней средой, размещение термоэлектрических преобразователей в защитной гильзе, заполнение последней материалами с разными характеристиками, геометрическое соотношение зазоров между ТЭП и гильзой) на погрешности измерения температуры на ТЭС.
5. Установление влияния отклонения рабочих температур вследствие погрешностей и высокой инерционности работы термоэлектрических преобразователей в процессе эксплуатации оборудования на надежность и безопасность работы систем, блоков и агрегатов ТЭС.
6. Разработка рекомендаций, направленных на повышение точности измерения температуры термоэлектрическими преобразователями в основных узлах, агрегатах и блоках ТЭС с целью обеспечения условий надежного, безопасного и эффективного функционирования последних.

**Научная новизна работы.** Разработан новый подход к повышению надежности работы и паркового ресурса систем, блоков и агрегатов ТЭС посредством оптимизации работы систем регулирования за счет учета реальных

условий их эксплуатации на тепловых электрических станциях. Поставлена и решена группа задач теплопереноса в системах с типичными термоэлектрическими преобразователями, соответствующими условиям эксплуатации основных узлов, агрегатов и блоков ТЭС. Учтены особенности конструкций ТЭП, отличия теплофизических свойств материалов основных элементов термодпар, неидеальные условия контакта с пая со средой или поверхностью, температура которой измеряется. Разработанные модели являются универсальными с точки зрения возможности использования для оценки погрешностей определения температур в различных узлах, блоках и агрегатах ТЭС с применением ТЭП. Они не имеют аналогов по постановке задач, алгоритмам решения и полученным результатам численного моделирования.

**Практическая значимость.** Разработанные модели нестационарного теплопереноса и алгоритмы оценки погрешностей измерений температуры ТЭП в основных блоках, узлах, агрегатах и технологических средах ТЭС могут использоваться для повышения скорости реакции систем регулирования температуры, работающих на тепловых электрических станциях. Это позволит снизить продолжительность работы установок, систем и агрегатов ТЭС в условиях нерегламентированных (особенно, наиболее опасных – предельных или максимальных) температур, увеличить длительность их безаварийной работы и повысить рабочий ресурс. Кроме того, полученные результаты могут применяться для анализа влияния негативных факторов и их совокупности на погрешность измерения температуры и последующей коррекции условий измерения (длительности работы ТЭП, тип номинальной статической характеристики (НСХ), условия монтажа датчика и др.). Сформулированные в диссертации рекомендации позволяют обосновать причины и минимизировать погрешности измерения температуры в узлах, агрегатах и блоках тепловых электрических станций (поверхностях турбоагрегата, металла труб коллекторов пароперегревателей парогенераторов, водяного пара, дымовых газов, воды, конденсата, смазки, топлива и т.д.).

**Степень достоверности результатов численных исследований.** Оценка достоверности полученных результатов исследований выполнена при проверке консервативности используемых разностных схем. В лабораторных условиях также проведены экспериментальные оценки. Сопоставлены результаты последних с полученными при численном моделировании. Откло-

нения не превысили 5 %. Сделаны выводы об удовлетворительной достоверности выполненных теоретических исследований и адекватности разработанных физических и математических моделей теплопереноса.

**Связь работы с научными программами и грантами.** Исследования выполнены в рамках программы «Разработка методов и средств повышения надежности и эффективности эксплуатации энергетических объектов» Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ). Основные положения диссертации используются в НИ ТПУ при подготовке бакалавров по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника», а также магистрантов по профилям «Компьютерные технологии проектирования тепловых и атомных электростанций», «Технологии производства электрической и тепловой энергии», «Научоемкие технологии измерений и управления в теплотехнике», «Тепломассообменные процессы и установки».

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госконтракты № 2.1410.2014, 2.1321.2014); РФФИ (проект № 14-08-00057); НИ ТПУ (проект № ВИУ\_ЭНИН\_94\_2014), РНФ (проект № 14-39-00003).

Тема диссертации соответствует приоритетному направлению развития науки в Российской Федерации (указ Президента РФ № 899 от 7 июня 2011 г.) «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а также критическим технологиям «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе» и «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

**Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Новый подход к оценке влияния погрешности измерения температуры в блоках, системах и агрегатах ТЭС на их надежность и рабочий ресурс с использованием группы моделей теплопереноса, соответствующих алгоритмов и методов численного моделирования.
2. Результаты исследований влияния основных факторов на погрешность выполнения измерений температуры:
  - увеличение воздушного зазора между чувствительным элементом ТЭП и поверхностью объекта измерения более чем на 3 мм вызывает рост

необходимой длительности работы ТЭП в 7–8 раз (на 40–70 % превышает время безаварийной работы узлов, блоков и агрегатов ТЭС при соответствующих температурах и является причиной несрабатывания или несвоевременного срабатывания соответствующих тепловых защит);

– необоснованно короткое (уменьшение даже на несколько секунд) время выполнения измерения температуры в условиях воздушного зазора может привести к большим (до 15–25 %) погрешностям (превышают допустимые 3–5 % в системах тепловых защит и блокировок ТЭС);

– использование защитных гильз приводит к увеличению необходимой длительности выполнения измерений в 8–10 раз (в отдельных случаях и выше). Необходимое время определяется совокупностью факторов, в том числе свойствами материалов, заполняющих гильзу, и геометрическими соотношениями размеров элементов системы «защитная гильза – ТЭП». Применение сыпучих материалов для заполнения защитных гильз может привести к снижению необходимой длительности выполнения измерения более чем в 3 раза (при такой оперативной информации система блокировок и тепловых защит с опережением получает информацию и может в следящем режиме предотвращать дальнейший рост/падение температуры);

– уровень заполнения защитных гильз «буферным» материалом оказывает существенное влияние на необходимую длительность измерения. Излишнее заполнение (превышение рекомендованного уровня, например, на 12 мм) может привести к увеличению необходимой длительности измерений на 6–8 % (для паровых турбин эти отклонения недопустимы при контроле температуры перегретого пара – парковый ресурс соответствующих блоков снижается на 9–12 %).

### 3. Установленные зависимости влияния на показатели надежности блоков, агрегатов и узлов ТЭС длительной их работы в условиях повышенных вследствие погрешностей измерения температур.

**Личный вклад** автора состоит в постановке задач диссертации, выборе методов и разработке алгоритмов их решения, теоретическом определении основных закономерностей влияния внешних и внутренних факторов на погрешности измерений температуры с применением ТЭП, проведении экспериментальных исследований на базе лабораторно-технического комплекса, обработке и анализе полученных результатов, разработке рекомендаций по

повышению надежности работы блоков, узлов и агрегатов тепловых электрических станций, формулировке выводов и заключений диссертации.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на Международной конференции «Энергосберегающие технологии», г. Томск, 28-30 июня 2011 г.; IV Всероссийской научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 10-12 октября 2013 г.; XX Международной конференции «Современные техника и технологии», г. Томск, 14-18 апреля 2014 г.; XI Международной конференции «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 22-25 апреля 2014 г.; II Международном форуме «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск, 6–10 октября, 2014 г.; V Всероссийской научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 15-17 октября 2014 г.; The International Conference on Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, г. Санкт-Петербург, 23-25 сентября 2014 г.; Международной научной школе «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», г. Томск, 22-23 апреля 2015 г.; V Всероссийской конференции «Измерения в современном мире-2015», г. Санкт-Петербург, 2-4 июня 2015 г.; VI Всероссийской конференции «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 13-15 октября 2015 г.; XX Юбилейном Международном научном симпозиуме «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, 4-6 апреля 2016 г.

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертационных исследований опубликованы в 16 печатных работах, в том числе 4 – в журналах из списка, рекомендованных ВАК («Энергетик», «Датчики и системы», «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета», «Главный энергетик»); 6 – в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science (The European Physical Journal Web of Conferences, MATEC Web of Conferences, Advanced Material Research), получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Разработанные программные коды и предложения по минимизации погрешностей измерения температуры рекомендованы к использованию на ТЭЦ-5 г. Омска, ГРЭС-2 г. Томска и станциях Беловского энергоуправления (получены 3 акта о внедрении результатов исследований).

**Структура и содержание работы.** Диссертационная работа включает следующие разделы: введение, три главы, заключение, список литературы. Рукопись изложена на 190 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка и 36 таблиц. Библиография включает 215 наименований.

### **Краткое содержание работы**

**В первой главе** представлен анализ влияния рабочей температуры на надежность и парковый ресурс агрегатов и блоков ТЭС. Проанализированы причины технологических аварий, которые обусловлены недостоверными данными, поступающими на системы контроля и регулирования температуры с ТЭП. Выполнен анализ возможных последствий аварий вследствие недостаточно точных измерений температуры на ТЭС. Приведены результаты анализа основных источников погрешностей измерения температуры ТЭП при разных темпах нагрева, соответствующих блокам, агрегатам и узлам ТЭС. Рассмотрено современное состояние исследований в области оценки погрешностей измерения температуры термоэлектрическими преобразователями. Выполнен обзор известных подходов к повышению точности измерений датчиками температуры различных поверхностей и сред. Определены типичные ограничения использования на ТЭС современных подходов и методов. Выполненный анализ показал, что результаты оценки погрешностей измерения температуры на ТЭС с использованием соответствующих моделей теплопереноса в чувствительных элементах ТЭП отсутствуют.

**Во второй главе** представлены разработанные физические и математические модели теплопереноса в системах с чувствительными элементами ТЭП при изолированном и неизолированном спаях (в соответствии с условиями работы типичных блоков, агрегатов и узлов ТЭС: змеевики пароперегревателей, коллекторы котельных установок, клапаны паровых турбин, трубопроводы конденсатно-питательного тракта), зазорами (в случае поверхностных измерений) и защитной гильзой, а также модели для оценки влияния теплоотвода от спая термопары на погрешности измерений. Приведено описание использованных методов численного моделирования, разработанных алгоритмов решения задач диссертации и оценки достоверности теоретических результатов. Для изучения влияния защитной гильзы и соответствующих факторов (свойства заполняющего гильзу материала, размера свободного пространства) разработана модель системы «гильза – заполняющий мате-

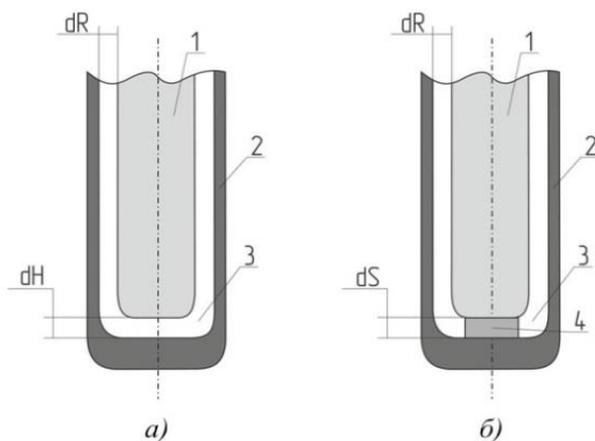


Рис. 1. Схема размещения чувствительного элемента в защитной гильзе: *a* – установка с зазором; *б* – установка пайкой, 1 – чувствительный элемент ТЭП, 2 – защитная гильза, 3 – свободное пространство, 4 – сварной шов

при установке по схеме, показанной на рис. 1, *a*, образуются кольцевой  $dR$  и вертикальный  $dH$  зазоры. При второй схеме (рис. 1, *б*) возможно образование кольцевого зазора  $dR$ .

Модель теплопереноса (рис. 1, *б*) включает систему нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных ( $0 < t < t_H$ ):

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right), \quad 0 < r < r_1, z_5 < z < H; \quad (1)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), \quad 0 < r < r_2, z_4 < z < z_5; r_1 < r < r_2, z_5 < z < H; \quad (2)$$

$$c_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right), \quad 0 < r < r_3, z_3 < z < z_4; r_2 < r < r_3, z_4 < z < H; \quad (3)$$

$$c_4 \rho_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \left( \frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_4}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right), \quad 0 < r < r_4, z_2 < z < z_3; r_3 < r < r_4, z_3 < z < H; \quad (4)$$

$$c_5 \rho_5 \frac{\partial T_5}{\partial t} = \lambda_5 \left( \frac{\partial^2 T_5}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_5}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_5}{\partial z^2} \right), \quad r_4 < r < r_5, z_2 < z < H; \quad (5)$$

$$c_6 \rho_6 \frac{\partial T_6}{\partial t} = \lambda_6 \left( \frac{\partial^2 T_6}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_6}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_6}{\partial z^2} \right), \quad 0 < r < R, 0 < z < z_1; r_5 < r < R, z_1 < z < H; \quad (6)$$

$$c_7 \rho_7 \frac{\partial T_7}{\partial t} = \lambda_7 \left( \frac{\partial^2 T_7}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_7}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_7}{\partial z^2} \right), \quad 0 < r < r_4, z_1 < z < z_2. \quad (7)$$

Индексы: 1 – спай, 2 – наконечник, 3 – порошок оксида алюминия, 4 – чехол, 5 – заполняющий гильзу материал, 6 – гильза, 7 – сварной шов.

На границах «спай термопары – керамический наконечник» ( $r=r_1, z=z_5$ ), «керамический наконечник–порошок  $Al_2O_3$ » ( $r=r_2, z=z_4$ ), «порошок  $Al_2O_3$ –защитный чехол» ( $r=r_3, z=z_3$ ), «защитный чехол–заполняющий гильзу материал» ( $r=r_4, z_2 < z < H$ ), «защитный чехол–сварной шов» ( $z=z_2, 0 < r < r_4$ ), «заполняющий гильзу материал–гильза» ( $r=r_5$ ), «сварной шов–защитная гильза»

( $z=z_1$ ),  $r=R$ ,  $r=0$ ,  $z=0$ ,  $z=H$  приняты граничные условия IV рода. Начальные условия:  $t=0$ ,  $T=T_0$ ,  $0 < z < H$ ,  $0 < r < R$ , где  $T_0=293$  К.

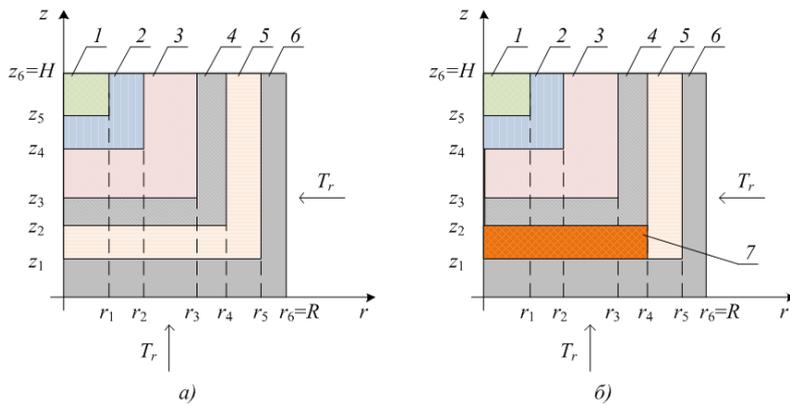


Рис. 2. Схема области решения задачи теплопереноса: а – установка с зазором; б – установка пайкой; 1 – спай термопары; 2 – керамический наконечник; 3 – порошок оксида алюминия; 4 – чехол ТЭП; 5 – заполняющий гильзу материал; 6 – защитная гильза; 7 – сварной шов

Для области решения задачи, приведенной на рис. 1, а, модель теплопереноса формулируется аналогично за исключением сварного шва и области 7, заполненной материалом

5. Высота и радиус моделируемого участка ТЭП в реальных условиях могут достигать 5 мм, толщина нижней стенки гильзы – 2,5 мм, боковой стенки – 1 мм. Соответствующие значения использовались при моделировании. Толщина

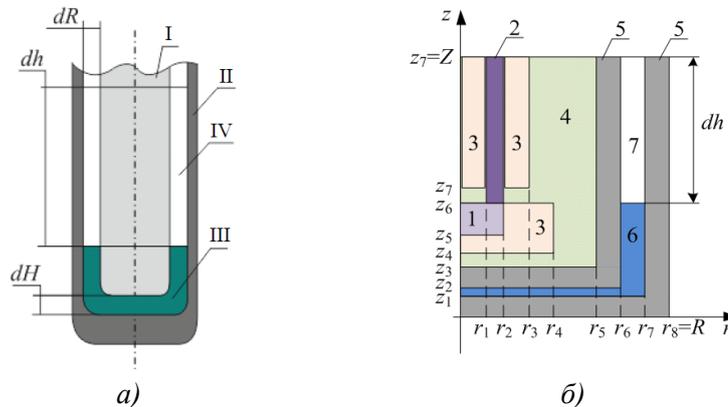


Рис. 3. Схема установки датчика (а) и области решения задачи (б): I – ТЭП; II – защитная гильза; III – заполняющий материал; IV – воздух; 1 – спай термопары; 2 – термоэлектрод; 3 – защитный керамический колпачок; 4 – порошок оксида алюминия; 5 – защитный стальной чехол/гильза; 6 – заполняющий материал; 7 – воздух

на сварного шва принималась равной 0,5 мм. В качестве материала припоя выбран медно-цинковый припой ПМЦ-54, заполняющих гильзу материалов – кремнийорганическая теплопроводная паста (термопаста), жидкие и сы-

пучие вещества (относительная плотность варьировалась от 70 % до 90 %).

Также выполнены исследования погрешности измерения температуры, обусловленной теплоотводом по материалу, заполняющему гильзу термопары. Схема установки датчика в гильзу и соответствующая область решения задачи теплопереноса приведена на рис. 3. Модель теплопереноса в этом случае дополняется уравнениями и граничными условиями для области  $dh$  ( $z_6 < z < z_7$ ).

Система уравнений (1)–(7) с начальными и граничными условиями решалась методом конечных разностей. Решение разностных аналогов дифференциальных уравнений проводилось локально-одномерным методом. Для решения системы разностных уравнений применялся метод прогонки на основе неявной четырёхточечной схемы. Основная проблема в решении сформулированных задач теплопереноса – «разрыв коэффициентов переноса» (скачкообразное изменение теплопроводности, теплоемкости и плотности) на границе раздела сред. Этот фактор осложняет решение задач математической физики с граничными условиями четвертого рода. Поэтому разработан специальный алгоритм решения всех задач диссертации, в основе которого была процедура выбора шага разностной сетки по времени, исходя из условий выполнения баланса энергии в исследуемой системе.

В третьей главе приведены основные результаты численных исследований влияния на точность измерения температуры в узлах, блоках и агрегатах ТЭС (и последствия несвоевременных и недостоверных данных измерений) группы факторов: наличие зазоров между ТЭП и поверхностью объекта измерения; теплофизические свойства материала, заполняющего защитную гильзу; геометрическое соотношение зазоров между ТЭП и гильзой.

Установлено, что воздушный зазор между ТЭП и поверхностью трубо-

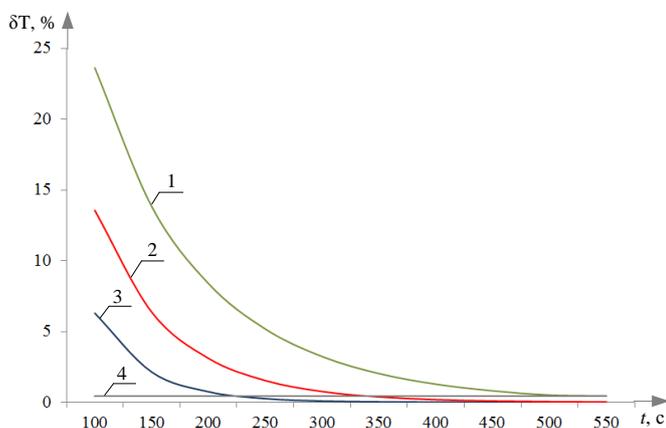


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности определения температуры от длительности измерения термопарой типа L (ХК) при температуре 550 К: 1 – воздушный зазор 3 мм, 2 – воздушный зазор 2 мм, 3 – воздушный зазор 1 мм, 4 – допускаемая регламентом погрешность

проводов или технологического оборудования ТЭС, температура которой измеряется, приводит к необходимости существенного увеличения длительности измерений для минимизации погрешностей (рис. 4).

С ростом измеряемой температуры время, необходимое для получения

достоверных (максимальная относительная погрешность удовлетворяет регламентам ТЭС) измерений ТЭП, увеличивается нелинейно. При этом для термопар с изолированным спаем минимально необходимое время работы

ТЭП незначительно (5–10 %) отличается от аналогичного показателя для термопар с неизолированным спаем. В частности, установлено, что нагревание до температуры в пределах допустимого отклонения для хромель-алюмелевой термопары 2 класса допуска происходит в течение 110–130 с, а показатель тепловой инерции такой термопары в среднем составляет 30 с. Таким образом, практически в 4 раза дольше агрегат ТЭС работает в условиях недостоверных измерений. Если такие условия реализуются вблизи максимальных возможных температур, то практика показывает, что для порыва парового или газового тракта нередко достаточно и меньше минуты. Порывы в пароперегревателях являются особо опасными, так как до момента снижения нагрузки или останова котла (эти процессы не могут выполняться мгновенно) разгерметизированный участок может существенно повредить смежные трубы пакета и вывести из строя группу блоков и систем ТЭС.

На примере пароперегревателя парового котла ТЭС показано, что уве-

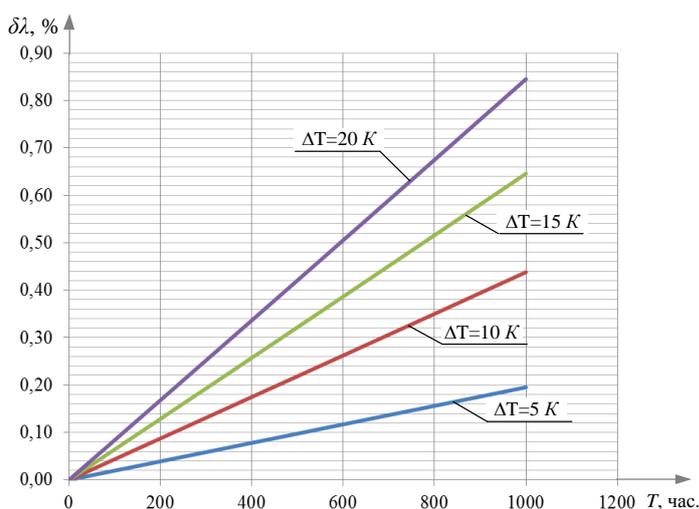


Рис. 5. Зависимость относительного увеличения интенсивности отказов пароперегревателя при работе в условиях повышенной температуры

ливание инерционности реак-

ций систем регулирования может привести к тому, что время его эксплуатации при повышенных (по отношению к проектным значениям) температурах достигает нескольких десятков часов. Вследствие этого, как правило, увеличивается интенсивность отказов пароперегревателя в зависимости от суммарной длительности работы при завышенных (предель-

ных) температурах (рис. 5). Статистика аварий на ТЭС показывает, что для работы на максимальных температурах оборудование с непрерывно продлеваемым парковым ресурсом без капвложений не готово (выход из строя возможен и в течение нескольких часов или даже минут). Установлено, что при наличии воздушного зазора между термопарой и объектом измерения погрешность (при условии удовлетворения термопары всем техническим требованиям) может быть уменьшена за счет обоснованного выбора длительности работы термопары.

Аналогичные исследования выполнены для термопар с изолированным спаем (табл. 1).

Табл. 1. Зависимость необходимой длительности работы термопары с изолированным (И.С.) и неизолированным (Н.С.) спаем типа  $L$  (ХК) от толщины воздушного зазора  $h$

$T, K$	$h=1 \text{ мм}$		$h=2 \text{ мм}$		$h=3 \text{ мм}$	
	И.С.	Н.С.	И.С.	Н.С.	И.С.	Н.С.
300	52,4	49,9	83,6	78,5	127,1	119,1
400	189,7	181,3	302,8	273,7	461,1	416,5
500	222,9	213,1	355,9	321,6	541,9	487,8
600	243,7	232,9	389,1	351,7	592,5	533,5
700	244,5	233,7	390,3	352,7	594,4	536,8
800	246,1	234,3	391,1	353,4	595,5	537,8

Модель теплопереноса в чувствительном элементе термоэлектрического преобразователя, установленного в защитной гильзе, позволила оценить влияние защитной гильзы на интегральные характеристики процесса теплопереноса в ТЭП (рис. 6). Установлено, что через 5–7 секунд после начала измерения без защитной гильзы (рис. 6, *a*) температура спая отличается от внешней температуры не более чем на 5 К.

В случае использования защитной гильзы температура спая термопары практически соответствует начальной, т.е. инерционность прогрева гильзы чрезвычайно влияет на работу ТЭП.

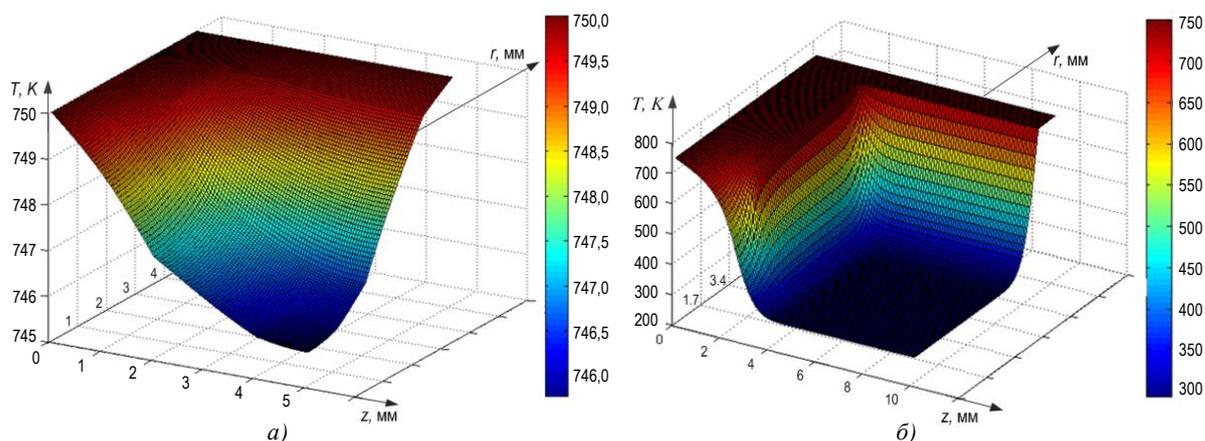


Рис. 6. Распределение температуры в чувствительном элементе ТЭП типа  $K$  (ХА) (длительность измерений – 5 секунд): *a* – без защитной гильзы; *б* – с защитной гильзой

Зависимости относительной погрешности ТЭП типа  $K$  от длительности измерений температуры (для различных диапазонов) приведены на рис. 7.

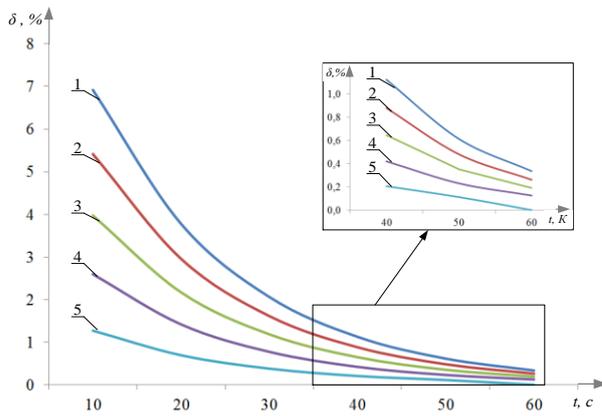


Рис. 7. Зависимость относительной погрешности термопары типа  $K$  (ХА) от длительности измерений при изменении рабочей температуры  $T=520\text{ K}$  на: 1 – 10 %; 2 – 8 %; 3 – 6 %; 4 – 4 %; 5 – 2 %

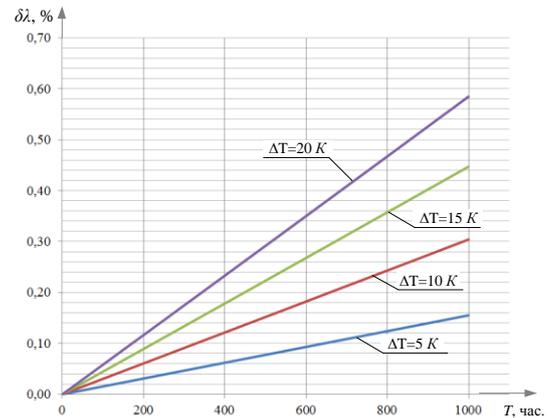


Рис. 8. Зависимость относительного увеличения интенсивности отказов тягодутьевых машин при работе в условиях повышенной (на 5–20 К) температуры

Датчики температуры с такой конструкцией используются для измерения температур подшипников тягодутьевых машин ТЭС – дутьевых вентиляторов, дымососов и т.п. Средний показатель наработки на отказ дутьевых вентиляторов находится в диапазоне от 23 тыс. часов до 26 тыс. часов, дымососов – в диапазоне от 11 тыс. часов до 14 тыс. часов. Это связано с тем, что дымососы, работающие с дымовыми газами с температурой в диапазоне от 423 К до 473 К, находятся в более «тяжелых» условиях по сравнению с дутьевыми вентиляторами. На рис. 8 показано относительное изменение интенсивности отказов тягодутьевых машин паровых котлов в зависимости от суммарной длительности работы при завышенных температурах рабочей среды. Установлено, что интенсивности отказов могут увеличиваться в 1,5–2 раза в условиях повышения температуры на 15–20 К относительно предельной. Для случаев длительной эксплуатации (более 200 часов в год) оборудования в условиях повышенных температур увеличение интенсивности отказов может достигать 1–2 %. Для теплонагруженного оборудования ТЭС при максимальных температурах эксплуатации это чрезвычайно высокие значения, требующие оперативного вмешательства. Своевременное обнаружение перегрева подшипников позволит предотвратить разрушение оборудования. Так, например, предупредительная сигнализация срабатывает при повышении температуры подшипников на 5 К (при номинальном значении 353 К). Исследования показали, что диапазоны недоверных измерений ТЭП на ТЭС могут существенно превышать 5 К.

Результаты диссертационных исследований (рис. 9) свидетельствуют о том, что продолжительность измерений увеличивается для всех ТЭП при заполнении гильзы жидкостями. Так, например, длительность работы ТЭП при использовании силиконового масла превышает аналогичный показатель по

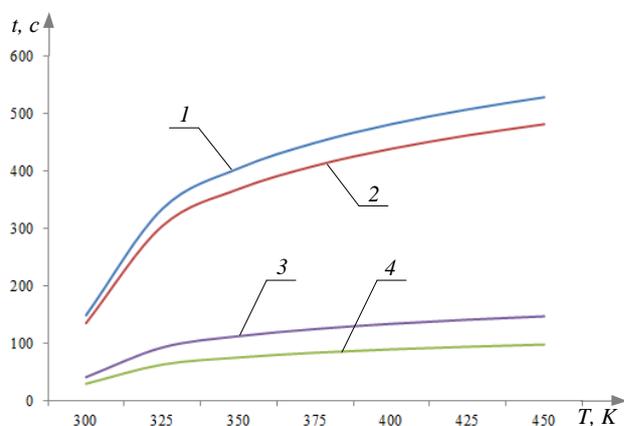


Рис. 9. Зависимость необходимой длительности работы термопары типа К при заполнении защитной гильзы материалами: 1 – силиконовое масло; 2 – трансформаторное масло; 3 – термопаста; 4 – кварцевый песок

сравнению с трансформаторным маслом на 8–10 %. Минимально необходимая длительность работы ТЭП при условии заполнения защитной гильзы термопастой меньше среднего показателя для масел в 5 раз. Это обусловлено тем, что теплопроводность термопасты значительно выше теплопроводности масел. Однако использование термопасты осложняется температурными ограничениями и часто коротким эксплуатационным сроком. Термопасту можно использовать при измерении температуры до 450 К, тогда как масла могут применяться до 550–570 К (в зависимости от их марки). Установлено, что медные опилки даже с небольшой относительной плотностью (70 %) характеризуются несоизмеримо малой необходимой длительностью измерений ТЭП относительно альтернативных материалов. Кварцевый песок обладает показателями, близкими термопасте.

Уровень заполнения гильзы (вне зависимости от материала) должен быть сравнительно мал, т.е. покрывать только активную часть чувствительного элемента. Это связано с погрешностью определения температуры вследствие оттока тепла от чувствительного элемента ТЭП. На рис. 10 видно, что при принятых значениях вертикального и кольцевого зазоров оптимальное значение уровня заполнения защитной гильзы составляет от 4 мм до 12 мм выше уровня спая термопары (минимальное время измерений получено при уровне 8 мм). При увеличении уровня заполнения гильзы длительность измерений возрастает вследствие отвода тепла от спая по материалу гильзы.

С практической точки зрения особый интерес представляет характер изменения оптимальной высоты заполнения  $dh$  (рис. 3, а) при изменении геометрического соотношения размеров системы «защитная гильза – чув-

ствительный элемент ТЭП» (рис. 11). В случае увеличения кольцевого зазора значение минимального уровня заполнения защитной гильзы смещается в сторону уменьшения и находится на уровне спая термопары. В случае увеличения (относительно принятого) вертикального зазора значение уровня заполнения гильзы смещается в сторону увеличения.

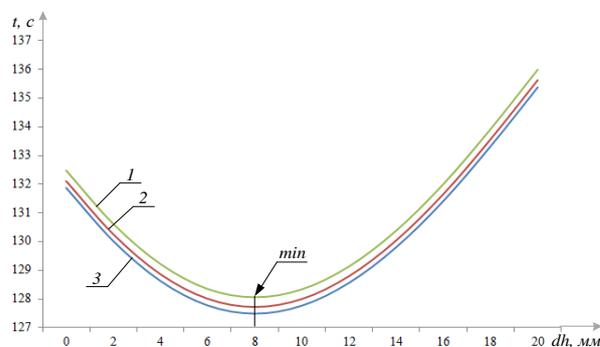


Рис. 10. Зависимость минимально необходимой длительности работы ТЭП (температура 350 К) для термопар типа ХКн (1), ХК (2), ХА (3)

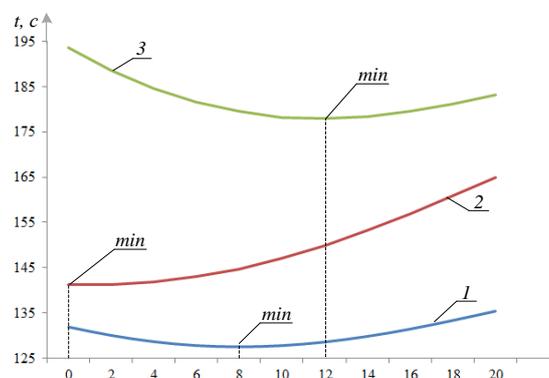


Рис. 11. Необходимые длительности работы ТЭП при изменении уровня заполнения гильзы трансформаторным маслом: 1 – принятые значения кольцевого и вертикального зазоров; 2 – увеличение кольцевого зазора на 1 мм; 3 – увеличение вертикального зазора на 1 мм

Анализ нормативных документов ТЭС показывает, что при пуске турбоустановок (например, с номинальными параметрами острого пара: температура 813 К, давление 13 МПа) на всех режимах разность температур металла в зоне паровпуска не должна превышать 50 К, разность температур внутренней и наружной поверхности стенки корпуса ЦВД не должна превышать 35 К. В стационарном режиме работы разность температур металла правого и левого стопорных клапанов (при наличии двух паровпускных трубопроводов) не должна превышать 30 К, разность температур металла, измеряемая поверхностными термопарами в верхней части корпуса автоматического затвора высокого давления и в зоне подвода пара не должна превышать 100 К и т.д. Диссертационные исследования показали реальные отклонения температур вследствие недостоверных измерений для этих и других узлов ТЭС. Полученные зависимости и аппроксимационные выражения позволяют прогнозировать и своевременно предотвратить недостоверные измерения и выход соответствующих температур за нормативные диапазоны.

Для оценки адекватности результатов моделирования выполнены экспериментальные исследования. Определение времени, необходимого для до-

стижения спаем ТЭП температуры, достаточной для получения удовлетворительной погрешности, проводилось в диапазоне от 400 К до 800 К на примере термопары типа *L* (ХК). Для уменьшения случайной погрешности выполнялись серии из 10 экспериментов в идентичных условиях. Отклонение теоретических результатов от экспериментальных не превысило 5 %. Этот результат позволяет сделать вывод о правомерности заключений, сделанных в диссертации с использованием моделирования.

**В четвертой главе** выделены основные направления применения полученных результатов исследований на ТЭС, приведены примеры того, как результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании и настройке систем тепловых защит и блокировок основного и вспомогательного оборудования тепловых электрических станций: систем защит по температуре свежего и вторичного пара, температуре воздуха и дымовых газов, пылевоздушной смеси. В частности, обосновано, что знание динамических характеристик термоэлектрических преобразователей и системы «термоэлектрический преобразователь – защитная гильза» позволит реализовать динамические уставки для защит с двухуровневым порогом срабатывания (в диссертации выделены соответствующие диапазоны для группы основных блоков, агрегатов и узлов ТЭС).

Показано, что повышение точности выполнения измерений также может быть одним из источников оптимизации технико-экономических показателей работы тепловой электрической станции. Например, знание динамических характеристик измерительного канала температуры позволяет максимально точно определять действительную температуру свежего пара и, как следствие, снизить перерасход перегретого пара. В диссертации представлены зависимости, в частности, иллюстрирующие длительности установления показаний термопары номинального значения 838 К, и зависимости перерасхода топлива от величины загрузки энергоблока при отклонении температуры свежего пара в пределах 5 %. Обосновано, что убытки вследствие этих факторов могут составлять 80–90 млн. руб. в год.

В рукописи также приведены акты использования результатов диссертационной работы, в частности, полученных зависимостей, аппроксимационных выражений и разработанных программ специалистами Омской ТЭЦ-5, Томской ГРЭС-2, ООО «Беловское энергоуправление». По результатам вы-

полненных исследований сформулированы рекомендации для снижения погрешностей термоэлектрических преобразователей на ТЭС.

**В заключении** подведены основные итоги выполненных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований.

### **Основные результаты и выводы**

1. Разработан новый подход к решению проблемы повышения надежности и рабочего ресурса узлов, установок и агрегатов ТЭС за счет повышения точности измерения температуры контактными датчиками.
2. Разработаны физические и математические модели теплопереноса в чувствительном элементе ТЭП с учетом конструкции датчика, позволяющие моделировать условия теплового контакта на ТЭС между поверхностью датчика и объектом измерения (поверхности турбоагрегата, коллекторов пароперегревателей парогенераторов, других агрегатов и блоков ТЭС).
3. Установлено влияние отклонения эксплуатационных температур рабочих сред в основных узлах и агрегатах ТЭС на показатели надежности и безопасности их работы. Показано, что относительное увеличение интенсивности отказов оборудования ТЭС при наработке до 1000 часов в условиях повышенных (нерегламентных) температур составляет, например:
  - а. для пароперегревателей ТЭС: до 0,49 % при температуре свежего пара, превышающей номинальную  $\Delta T=10$  К; до 0,37 % при  $\Delta T=7,5$  К; до 0,25 % при  $\Delta T=5$  К; до 0,12 % при  $\Delta T=2,5$  К.
  - б. для тягодутьевого оборудования ТЭС: до 0,58 % при  $\Delta T=20$  К; до 0,44 % при  $\Delta T=15$  К; до 0,3 % при  $\Delta T=10$  К; до 0,16 % при  $\Delta T=5$  К.

При статистическом анализе обоснована масштабность отклонений показателей надежности основных блоков ТЭС даже в пределах 1 %. Для случаев длительной эксплуатации (более 200 часов в год) оборудования ТЭС в условиях повышенных температур увеличение интенсивности отказов может достигать 1–3 %. Эти изменения представляют для энергоблоков ТЭС чрезвычайно опасные индикаторы, осложняющиеся старением металла.

4. Увеличение воздушного зазора между чувствительным элементом ТЭП и поверхностью объекта измерения более чем на 3 мм вызывает рост необходимой длительности работы ТЭП в 7–8 раз (на 40–70 % превышает время безаварийной работы узлов, блоков и агрегатов ТЭС при соответ-

ствующих температурах и является причиной несрабатывания или несвоевременного срабатывания соответствующих тепловых защит).

5. Необоснованно короткое (уменьшение даже на несколько секунд) время выполнения измерения температуры в условиях воздушного зазора может привести к большим (до 15–25 %) погрешностям (превышают допустимые в системах тепловых защит и блокировок ТЭС – 3–5 %).
6. Использование защитных гильз приводит к увеличению необходимой длительности измерений в 8–10 раз (в отдельных случаях и выше). Необходимое время определяется свойствами материалов, заполняющих гильзу, и геометрическими размерами системы «гильза – ТЭП». Применение сыпучих материалов для заполнения защитных гильз может привести к снижению необходимой длительности выполнения измерения более чем в 3 раза (при такой оперативной информации система блокировок и тепловых защит с опережением получает информацию и может в следящем режиме предотвращать дальнейший рост/падение температуры).
7. Уровень заполнения гильз «буферным» материалом оказывает существенное влияние на необходимую длительность измерения. Излишнее заполнение (превышение рекомендованного уровня, например, на 12 мм) может привести к увеличению необходимой длительности измерений на 6–8 % (для паровых турбин эти отклонения не приемлемы при контроле температуры перегретого пара – парковый ресурс соответствующих блоков снижается на 9–12 %).
8. Сформулированы рекомендации для повышения надежности и рабочего ресурса узлов, установок и агрегатов ТЭС за счет повышения точности измерения температуры контактными датчиками в условиях неполного контакта с контролируемым объектом, при использовании защитных гильз и разных заполняющих их материалов.

#### **Основные публикации по теме диссертации**

1. **Atroshenko Y.K.**, Mathematical simulation of thermal contact of thermocouple for research of an error of measurements / Y.K. Atroshenko, O.S. Yashutina, P.A. Strizhak // Proceedings of the 2014 International Conference on Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, Saint Petersburg, 23–25 Sept. 2014. P. 280–283.
2. **Atroshenko Y.K.** Predictive Modelling of the Warming up Times for Thermo-

- electric Converters / Y.K. Atroshenko, I.P. Ozerova, P.A. Strizhak // *Advanced Materials Research*. – 2014. – V. 1040. – P. 965-968.
3. **Atroshenko Y.K.** Numerical evaluation of the measurement error of temperature by surface thermocouples in the conditions of incomplete thermal contact with object of measurement / Y.K. Atroshenko, P.A. Strizhak // *EPJ Web of Conferences*. – 2014. – Vol. 76, 01034.
  4. **Атрошенко Ю.К.** Оценка погрешности измерения ТЭП в различных условиях теплового контакта / О.С. Яшутина, Ю.К. Атрошенко // Сборник трудов II форума «Интеллектуальные энергосистемы» (г. Томск, 6–10 октября 2014). Изд-во ТПУ, 2014. С. 170–174.
  5. **Атрошенко Ю. К.** Влияние теплового контакта на результаты измерений поверхностных термоэлектрических преобразователей / Ю.К. Атрошенко, И.П. Озерова, П.А. Стрижак // СПб.: Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского гос. политехнического ун-та. – 2015. – № 1 (214). – С. 97–105.
  6. **Атрошенко Ю.К.** Необходимое время измерения термоэлектрическими преобразователями с защитными гильзами / Ю.К. Атрошенко, П.А. Стрижак // *Датчики и системы*. – 2015. – № 5 (192). – С. 23–27.
  7. **Atroshenko Y.K.** Determination of necessary time of measurements of surface thermocouples depending on conditions of technological processes / Y.K. Atroshenko, P.A. Strizhak, O.S.Yashutina // *EPJ Web of Conferences*. – 2015. – Vol. 82, 01061.
  8. **Atroshenko Y.K.** Numerical Research of the Measurement Error of Temperature Thermocouples with the Isolated Seal / Y.K. Atroshenko, A.A. Bychkova, P.A. Strizhak // *MATEC Web of Conferences*. – 2015. – Vol. 23, 01017.
  9. **Atroshenko Y.K.** Process Simulating of Heat Transfer in Hightemperature Thermocouples / Y.K. Atroshenko, A.A. Bychkova, P.A. Strizhak // *MATEC Web of Conferences*. – 2015. – Vol. 23, 010065.
  10. **Атрошенко Ю.К.** О влиянии защитной гильзы на погрешности измерения температуры термоэлектрическими преобразователями / Ю.К. Атрошенко, П.А. Стрижак // *Энергетик*. – 2015. – № 10. – С. 20–24.
  11. **Атрошенко Ю.К.** Оптимизация теплопереноса в термоэлектрическом преобразователе / Ю.К. Атрошенко, П.А. Стрижак // *Главный энергетик*. – 2015. – № 11-12. – С. 60–67.