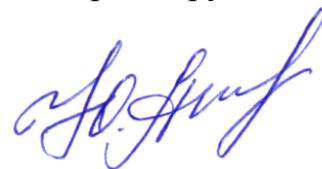


На правах рукописи



Атрошенко Юлиана Константиновна

**ПРОГНОСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ОЦЕНКАХ
ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУР В
УЗЛАХ, БЛОКАХ И АГРЕГАТАХ ТЕПЛОВЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ**

**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 – 2015

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

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

кандидат технических наук, доцент
Озерова Ирина Петровна

Официальные оппоненты: Богомоллов Александр Романович,
доктор технических наук, профессор,
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово,
старший научный сотрудник, Институт
теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск

Резник Сергей Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, ул. Красносельская, 51.

Защита состоится «25» декабря 2015 г. в 13.00 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:7777/council/2803/worklist>.

Автореферат разослан: «30» октября 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.269.13
кандидат технических наук



А.С.Матвеев

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Для основных узлов, блоков и агрегатов тепловых электрических станций (ТЭС) измерения температуры играют определяющую роль при контроле параметров технологических процессов, направленных на производство тепловой и электрической энергии. Анализ нормативных документов показывает, что доля измерений температуры в системах контроля и управления составляет не менее 30 % от общего числа измеряемых и регулируемых параметров, а в отдельных случаях этот показатель может достигать 40–50 %. Это связано с тем, что температура наряду с давлением является важнейшим показателем безопасности работы оборудования тепловых электрических станций как в переходных, так и стационарных режимах работы. Так, превышение температуры пара на выходе из котла приводит к чрезмерному повышению температуры металла трубок пароперегревателя, что может привести к выходу его из строя. В части эксплуатации турбоустановок во избежание возникновения аварий строгий контроль температуры требуется во всех системах: при эксплуатации турбин, систем подогрева питательной воды, систем технического водоснабжения.

Наиболее широко используемыми датчиками в системах контроля и управления технологическими процессами на ТЭС являются термоэлектрические преобразователи. Эти типы датчиков охватывают требуемый диапазон измеряемых температур в основных блоках, агрегатах и узлах ТЭС.

Одной из основных причин погрешностей измерений температуры термоэлектрическими преобразователями (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.

Попытки исследований влияния выше перечисленных факторов на условия и характеристики процессов измерений предпринимались ранее. Можно выделить труды Визгалова С.В., Ибраева А.М., Шарапова И.И., Су Цзюнь, Кочан О.В., Йоцова В.С., Боровковой Т.В., Товстоного 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 пока нет оснований утверждать, что задачи оценки влияния неидеальности контакта спая термопары с материалом на погрешности измерений его температуры в условиях, соответствующих работе узлов, блоков и агрегатов ТЭС, решены в полной мере.

Традиционным следует считать подход к изучению выделенной проблемы с применением моделей, рассматривающих достаточно упрощенно систему «ТЭП – внешняя среда» (ТЭП представляется в виде пары термоэлектродов и спая). На условия теплопереноса в ТЭП определяющее влияние могут оказывать конструктивные особенности, составные элементы, их материал. Результаты исследований этих факторов не опубликованы. Скорее всего, основной причиной является отсутствие соответствующих моделей нестационарного теплопереноса для их изучений. Спецификой температурных измерений на ТЭС является необходимость защиты чувствительного элемента датчика от негативного воздействия контролируемой среды (помещение в защитные гильзы), а также измерение высоких температур поверхностей (воздухоподогреватели, пароперегреватели, теплообменные аппараты). Разработка физических и математических моделей для прогноза погрешностей измерения температуры термопарами различных типов и конструкций позволит повысить качество работы систем контроля, управления и защиты основных блоков, агрегатов и узлов ТЭС. Для решения поставленной задачи целесообразно разработать новый подход, отличающийся от известных созданием группы моделей сопряженного теплопереноса для разных конструкций и условий эксплуатации ТЭП на тепловых электрических станциях.

Целью работы является математическое моделирование температурных полей в системе «спай ТЭП – промежуточный слой – материал, среда или поверхность, температура которой измеряется» и анализ влияния основных факторов, являющихся источником погрешностей в условиях неидеального контакта спая и материала, на результаты измерений температуры.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка нового подхода к оценке основных погрешностей измерений температуры в блоках, агрегатах и узлах ТЭС с использованием группы моделей теплопереноса и методов численного моделирования.
2. Создание физических и математических моделей процессов теплопереноса в системах «чувствительный элемент ТЭП – объект измерения» и «чувствительный элемент ТЭП – защитная гильза».
3. Выбор методов решения систем нестационарных уравнений теплопереноса в частных производных. Разработка алгоритма решения поставленных задач диссертации. Проверка созданных моделей на адекватность с использованием метода оценки консервативности применяемых разностных схем. Разработка экспериментальной методики и проведение опытов для определения минимальных длительностей работы ТЭП, обеспечивающих достоверные измерения. Сопоставление полученных теоретических результатов с экспериментальными.
4. 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.

5. Анализ возможных способов повышения точности измерения температуры термоэлектрическими преобразователями в основных узлах, агрегатах и блоках ТЭС. Разработка соответствующих рекомендаций.

Научная новизна работы. Впервые 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 термодвигателей, условия неидеального контакта спая 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 блоках, узлах, агрегатах и технологических средах ТЭС могут использоваться 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 позволят выявить причины погрешностей 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.) и минимизировать их.

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. Отклонения 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. Диссертационные исследования выполнены в рамках научно-технической программы «Теплофизика и теплоэнергетика» по направлению научной деятельности Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) «Разработка методов и средств повышения надежности и эффективности эксплуатации энергетических объектов». 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», «Наукоемкие технологии измерений и управления в теплотехнике», «Тепломассообменные процессы и установки».

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госконтракты № 2.1410.2014, 2.1321.2014); РФФИ (проект № 14-08-00057); НИ ТПУ (проект № ВИУ_ЭНИН_94_2014) в рамках программы повышения конкурентоспособности вуза на российском и мировом уровне научно-образовательных услуг.

Тема диссертационной работы 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 результатов, выносимые на защиту:

1. Новый подход к оценке погрешностей измерений температуры в блоках, агрегатах, узлах и средах ТЭС с использованием группы моделей теплопереноса, соответствующих алгоритмов и методов численного моделирования.
2. Физические и математические модели нестационарного теплопереноса в системе «ТЭП – внешняя среда» при разных условиях нагрева, конструкциях ТЭП и материалах основных элементов.
3. Результаты исследований влияния группы факторов (условия теплового контакта, наличие защитной гильзы, тип заполняющего гильзу материала, уровень заполнения гильзы, толщины вертикальных и кольцевых зазоров между гильзой и ТЭП) на погрешность выполнения измерений:
 - увеличение воздушного зазора между чувствительным элементом ТЭП и поверхностью объекта измерения более чем на 3 мм вызывает увеличение необходимой длительности работы ТЭП в 7–8 раз;
 - необоснованно короткое (уменьшение даже на несколько секунд) время выполнения измерения температуры в условиях воздушного зазора может привести к большим (до 15–25 %) погрешностям измерений;
 - использование защитных гильз приводит к увеличению необходимой длительности выполнения измерений практически в 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;

– уровень заполнения защитных гильз «буферным» материалом оказывает влияние на необходимую длительность измерения. Излишнее заполнение (превышение рекомендованного уровня, например, на 12 мм) может привести к увеличению необходимой длительности измерений (на 6–8 %).

4. Сформулированные рекомендации по коррекции условий выполнения измерений с учетом основных (значимых) установленных факторов, направлены на минимизацию погрешностей измерений, повышение качества работы систем контроля и управления блоками, агрегатами и узлами ТЭС.

Личный вклад автора состоит в постановке задач диссертации, выборе методов и разработке алгоритмов их решения, 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 выполнения измерений в блоках, узлах и агрегатах тепловых электрических станций, формулировке выводов и заключений работы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной конференции «Энергосберегающие технологии», г. Томск, 28-30 июня 2011 г.; IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 10-12 октября 2013 г.; XX Международной научно-практической 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-семинаре «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», г. Томск, 22-23 апреля 2015 г.; V Всероссийской научно-технической конференции «Измерения в современном мире-2015», г. Санкт-Петербург, 2-4 июня 2015 г.

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 15 печатных работах, в том числе 3 – в журналах из списка, рекомендованных ВАК: «Энергетик», «Датчики и системы», «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета»; 5 – в изданиях, индексируемых базой данных Scopus. Получены 3 акта внедрения результатов диссертационных исследований на объектах теплоэнергетического сектора. Разработанные программные коды и предложения по минимизации погрешностей измерения температуры рекомендованы к использованию на ТЭЦ-5 г. Омска и ГРЭС-2 г. Томска.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа включает следующие разделы: введение, три главы, заключение, список литературы. Диссертация изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков и 30 таблиц. Библиография включает 165 наименований.

Краткое содержание работы

В первой главе представлены результаты анализа основных источников погрешностей измерения температуры термоэлектрическими преобразователями при разных темпах нагрева, соответствующих современным блокам, агрегатам и узлам ТЭС. Приведены примеры технологических аварий, которые связаны с неисправностью систем контроля и регулирования температуры. Выполнен анализ возможных последствий аварий вследствие недостоверных измерений температуры на ТЭС. Рассмотрено современное состояние исследований в области оценки погрешностей измерения температуры термоэлектрическими преобразователями. Выполнен обзор известных подходов к повышению точности измерений температуры поверхностей и сред различными датчиками. Установлены типичные ограничения использования на ТЭС современных подходов и методов для прогнозирования и объяснения причин погрешностей соответствующих измерений. Установлено, что результаты оценки погрешностей измерения температуры на ТЭС с использованием моделей, учитывающих процессы теплопереноса в чувствительных элементах ТЭП, отсутствуют.

Во второй главе представлены разработанные физические и математические модели теплопереноса в системах с чувствительными элементами

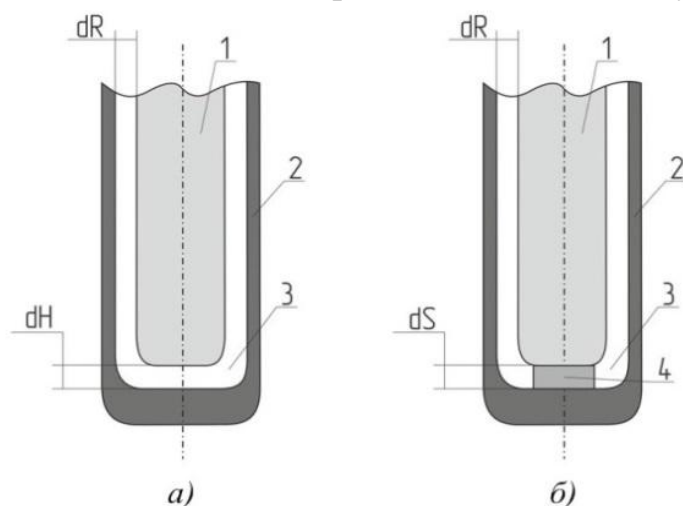


Рис. 1. Схема размещения чувствительного элемента в защитной гильзе: а – установка с зазором; б – установка пайкой, 1 – чувствительный элемент ТЭП, 2 – защитная гильза, 3 – свободное пространство, 4 – сварной шов

ТЭП при изолированном и неизолированном спаях (в соответствии с условиями работы типичных блоков, агрегатов и узлов ТЭС), с зазорами (в случае поверхностных измерений) и защитной гильзы, 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 простран-

ва) разработана модель системы «защитная гильза – заполняющий материал – чувствительный элемент ТЭП» (рис. 1 и 2).

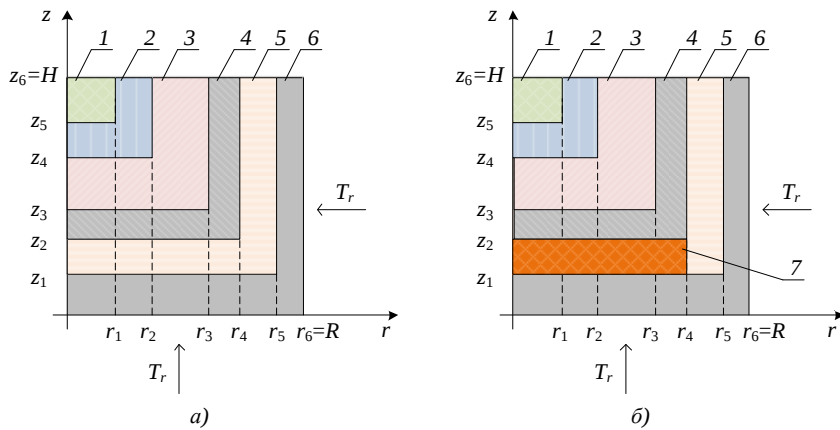


Рис. 2. Схема области решения задачи теплопереноса:
а – установка с зазором; б – установка пайкой; 1 – спай термопары; 2 – керамический наконечник; 3 – порошок оксида алюминия; 4 – чехол ТЭП; 5 – заполняющий гильзу материал; 6 – защитная гильза; 7 – сварной шов

В соответствии с регламентом измерений чувствительный элемент 1 (рис. 1) помещается в гильзу 2. При этом он может быть приварен ко дну гильзы (рис. 1, б) или установлен с зазором (рис. 1, а). В случае установки по схеме,

показанной на рис. 1, а, образуются кольцевой dR и вертикальный dH зазоры. При второй схеме (рис. 1, б) возможно образование кольцевого зазора adR .

Модель теплопереноса (рис. 2, б) включает систему нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных ($0 < t < t_H$):

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

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

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

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

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

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

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

Здесь индексы: 1 – спай термопары, 2 – керамический наконечник, 3 – порошок оксида алюминия, 4 – защитный чехол, 5 – заполняющий гильзу материал, 6 – защитная 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» ($z=z_2, 0 < r < r_4$), «запол-

няющий гильзу материал–гильза» ($r=r_5$), «сварной шов–защитная гильза» ($z=z_1$), $r=R$, $r=0$, $z=0$, $z=H$ приняты следующие граничные условия (табл. 1).

Табл. 1. Граничные условия задачи теплопереноса в ТЭП с защитной гильзой

$T_1(r_1, z) = T_2(r_1, z);$ $-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big _{r=r_1} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big _{r=r_1}$	$(z_5 < z < H);$	$T_1(r, z_5) = T_2(r, z_5);$ $-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big _{z=z_5} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big _{z=z_5}$	$(0 < r < r_1);$
$T_2(r_2, z) = T_3(r_2, z);$ $-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big _{r=r_2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big _{r=r_2}$	$(z_4 < z < H);$	$T_2(r, z_4) = T_3(r, z_4);$ $-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big _{z=z_4} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} \Big _{z=z_4}$	$(0 < r < r_2);$
$T_3(r_3, z) = T_4(r_3, z);$ $-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big _{r=r_3} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big _{r=r_3}$	$(z_3 < z < H);$	$T_3(r, z_3) = T_4(r, z_3);$ $-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} \Big _{z=z_3} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial z} \Big _{z=z_3}$	$(0 < r < r_3);$
$T_4(r_4, z) = T_5(r_4, z);$ $-\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big _{r=r_4} = -\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r} \Big _{r=r_4}$	$(z_2 < z < H);$	$T_4(r, z_2) = T_7(r, z_2);$ $-\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial z} \Big _{z=z_2} = -\lambda_7 \frac{\partial T_7}{\partial z} \Big _{z=z_2}$	$(0 < r < r_4);$
$T_7(r_4, z) = T_5(r_4, z);$ $-\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big _{r=r_4} = -\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r} \Big _{r=r_4}$	$(z_1 < z < z_2);$	$T_7(r, z_1) = T_6(r, z_1);$ $-\lambda_7 \frac{\partial T_7}{\partial z} \Big _{z=z_1} = -\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial z} \Big _{z=z_1}$	$(0 < r < r_4);$
$T_5(r_5, z) = T_6(r_5, z);$ $-\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r} \Big _{r=r_5} = -\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial r} \Big _{r=r_5}$	$(z_1 < z < H);$	$T_5(r, z_1) = T_6(r, z_1);$ $-\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial z} \Big _{z=z_1} = -\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial z} \Big _{z=z_1}$	$(r_4 < r < r_5);$
$T = T_r$	$(z=0);$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$(r=0);$
$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$	$(z=H);$	$T = T_r$	$(r=R).$

Начальные условия: $t=0$, $T=T_0$, $0 < z < H$, $0 < r < R$, где $T_0=293$ К.

Для области решения задачи, приведенной на рис. 2, 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 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 сыпучие вещества (относительная плотность варьировалась от 70 % до 90 %). Также выполнены исследования погрешности измерения температуры, обусловленной теплоотводом по материалу, заполняющему гильзу термодатчиков. Схема установки датчика в гильзу и соответствующая область решения зада-

чи теплопереноса приведена на рис. 3. Модель теплопереноса (1)–(7) в этом случае дополняется дифференциальными уравнениями соответствующими граничными условиями для области dh ($z_6 < z < Z$).

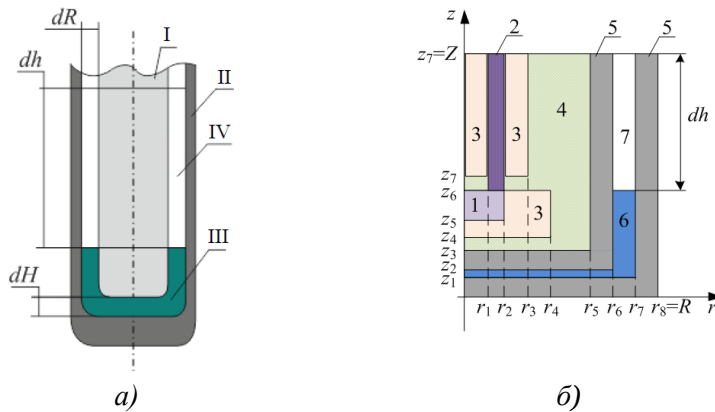


Рис. 3. Схема установки датчика (а) и области решения задачи (б): I – ТЭП; II – защитная гильза; III – заполняющий материал; IV – воздух; 1 – спай термопары; 2 – термоэлектрод; 3 – защитный керамический колпачок; 4 – порошок оксида алюминия; 5 – защитный стальной чехол/гильза; 6 – заполняющий материал;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

Система уравнений (1)–(7) с соответствующими начальными и граничными условиями решалась методом конечных разностей. Решение разностных аналогов дифференциальных уравнений (линейных алгебраических), проводилось локально-одномерным методом. Для решения системы разностных уравнений применял-

ся 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 существенно 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.

Достоверность результатов моделирования оценивалась в соответствии с алгоритмами проверки консервативности используемых разностных схем. Кроме того, получена хорошая корреляция теоретически и экспериментально установленных минимальных длительностей измерений температуры с применением ТЭП.

В третьей главе приведены основные результаты численных исследований закономерностей возникновения погрешностей при измерении температуры в узлах, блоках и агрегатах ТЭС, обусловленные группой факторов: наличие зазоров между ТЭП и поверхностью объекта измерения; изменение плотности заполняющего ТЭП порошка оксида алюминия; теплофизические свойства материала, заполняющего защитную гильзу; геометрическое соотношение зазоров между ТЭП и гильзой; влияние эффекта отвода тепла от спая термопары по материалу, заполняющему гильзу.

Установлено, что воздушный зазор между ТЭП и поверхностью трубопроводов или технологического оборудования ТЭС, температура которой из-

меряется, приводит к необходимости существенного увеличения длительности измерений для минимизации погрешностей (рис. 4 и 5).

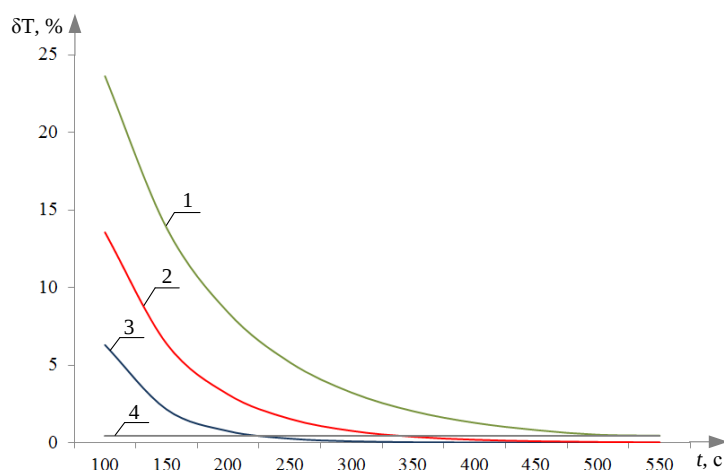


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности определения температуры от длительности измерения термопарой типа L(XK) при температуре 550 К: 1 – воздушный зазор 3 мм, 2 – воздушный зазор 2 мм, 3 – воздушный зазор 1 мм, 4 – допускаемая регламентом погрешность

с неизолированным спаем.

Зависимости, представленные на рис. 5, иллюстрируют, 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. 2).

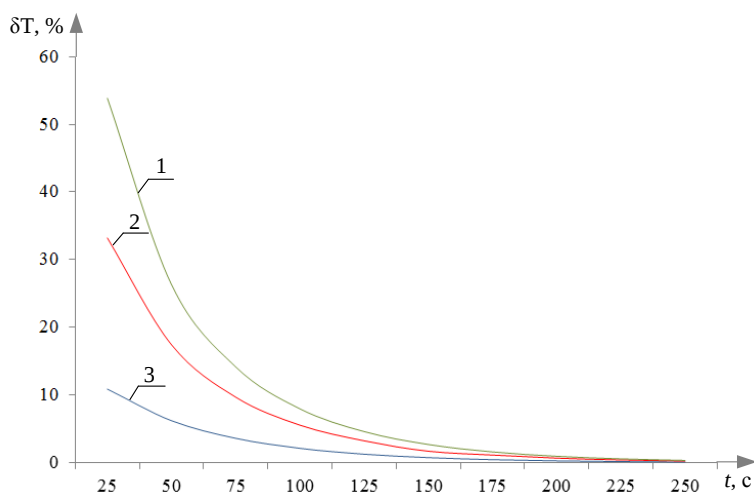


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности определения температуры от длительности измерений термопарой типа L(XK) в условиях воздушного зазора 1 мм (при температурах: 1 – 700 К, 2 – 550 К, 3 – 350 К)

Табл. 2. Зависимость необходимой длительности работы термопары с изолированным (И.С.) и неизолированным (Н.С.) спаем типа L(XK) от толщины воздушного зазора h

Т, К	$h=1$ мм		$h=2$ мм		$h=3$ 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
350	158,1	150,9	252,2	236,8	383,9	359,5
400	189,7	181,3	302,8	273,7	461,1	416,5
450	209,1	199,7	333,7	313,3	508,1	475,6

Т, К	h=1 мм		h=2 мм		h=3 мм	
	И.С.	Н.С.	И.С.	Н.С.	И.С.	Н.С.
500	222,9	213,1	355,9	321,6	541,9	487,8
550	233,8	223,5	373,3	350,4	568,4	532,1
600	243,7	232,9	389,1	351,7	592,5	533,5
650	243,6	233,4	389,8	352,3	592,3	534,4
700	244,5	233,7	390,3	352,7	594,4	536,8
750	244,7	233,9	390,7	353,1	595,2	537,4
800	246,1	234,3	391,1	353,4	595,5	537,8
850	245,2	234,5	391,4	353,7	595,9	538,2

Модель теплопереноса в чувствительном элементе термоэлектрического преобразователя, установленного в защитной гильзе, позволила оценить влияние защитной гильзы на интегральные характеристики процесса теплопереноса в чувствительном элементе термопары (рис. 6).

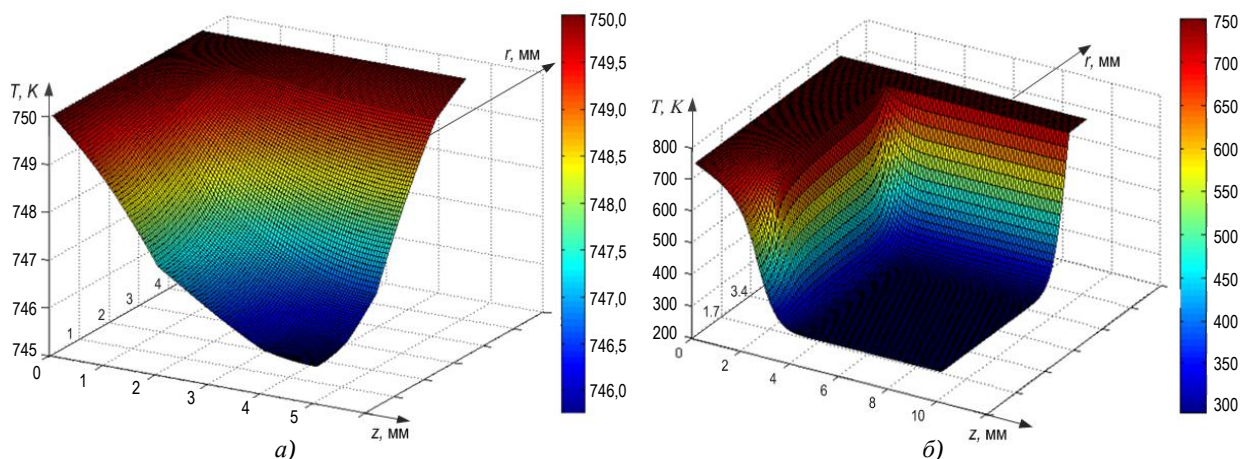


Рис.6. Распределение температуры в чувствительном элементе ТЭП типа К(ХА) (длительность измерений – 5 секунд): а – без защитной гильзы; б – с защитной гильзой

Анализ рис. 6 показывает, что защитная гильза оказывает значительное влияние на процесс теплопереноса в чувствительном элементе ТЭП. Через 5 секунд после начала измерения без защитной гильзы (рис. 6, а) температура спая отличается от внешней температуры не более чем на 5 К. В случае наличия защитной гильзы температура спая термопары практически соответствует начальной. Такой вид распределений температуры (рис. 6, б) позволяет сделать вывод о том, что для снижения погрешно-

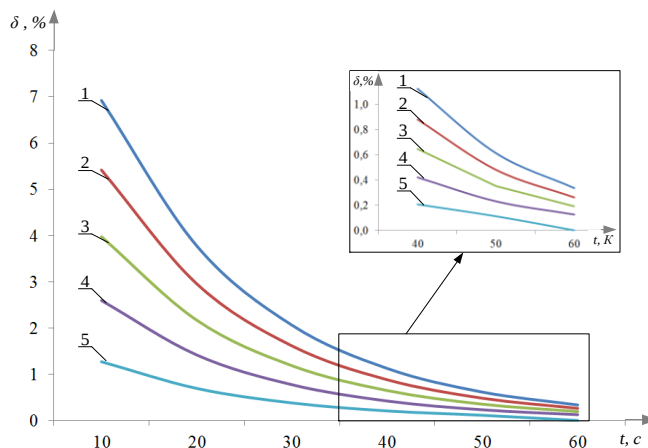


Рис.7. Зависимость относительной погрешности термопары типа

сти требуется уве- $K(XA)$ от длительности измерений при изменении рабочей температуры $T=520$ К на: 1 – 10 %; 2 – 8 %; 3 – 6 %; 4 – 4 %; 5 – 2 % личить длительность измерений.

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

Для типов термопар, применяемых в блоках, агрегатах и узлах ТЭС, получены аналогичные зависимости изменения относительной погрешности. Это позволяет сделать вывод о том, что время работы термоэлектрических преобразователей, устанавливаемых в гильзе и обеспечивающих минимальные погрешности, практически не зависит от измеряемой температуры и типа термопары.

Определить требуемую длительность измерений температуры можно как с помощью разработанных моделей, так и группы полученных аппроксимационных выражений вида:

$$t = A \cdot \delta^3 + B \cdot \delta^2 + C \cdot \delta + D, \quad (8)$$

где t – необходимая длительность работы ТЭП, с; δ – отклонение температуры от начального значения, %; A, B, C, D – коэффициенты, зависящие от материала, заполняющего гильзу, типа ТЭП, а также от соотношения размеров чувствительного элемента и защитной гильзы. Коэффициенты аппроксимационного выражения A, B, C, D определены в рамках диссертационной работы для термопар типов K, E, L при измерении температуры от 300 К до 540 К.

С помощью разработанной модели теплопереноса в чувствительном элементе термоэлектрического преобразователя, установленного в защитной гильзе, также выполнены исследования минимально необходимой длительности измерений при использовании различных теплопроводных материалов, заполняющих защитную гильзу (рис. 8).

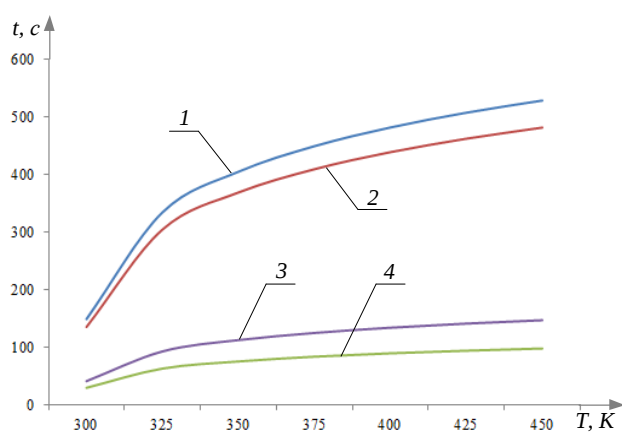


Рис.8. Зависимость необходимой длительности работы термопары типа K при заполнении защитной гильзы материалами: 1 – силиконовое масло; 2 – трансформаторное масло; 3 – термопаста; 4 – кварцевый песок

Полученные результаты 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 сравнению 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). Полученные результаты показывают, 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. Тем не менее, применение медных опилок характеризуется существенными недостатками (большой коэффициент термического расширения и высокая плотность). При этом следует отметить, что 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. Для оценки оптимальной высоты заполнения защитной гильзы теплопроводным материалом использована модель теплопереноса (рис. 3). На рис. 9 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 термопары по материалу защитной 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 – чувствительный элемент ТЭП» (рис. 10). 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.

Для оценки адекватности результатов моделирования выпол-

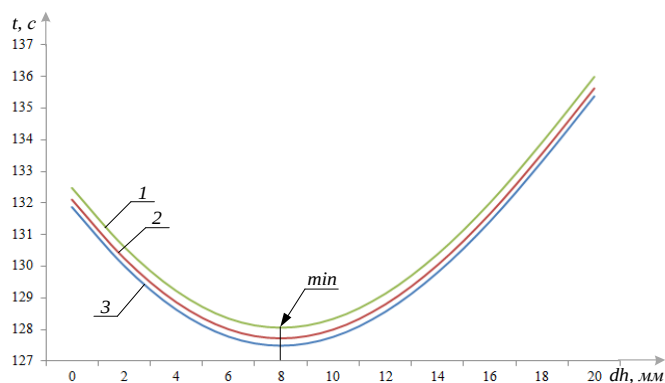


Рис. 9. Зависимость минимально необходимой длительности работы ТЭП (температура 350 К) для термопар типа ХКн (1), ХК (2), ХА (3)

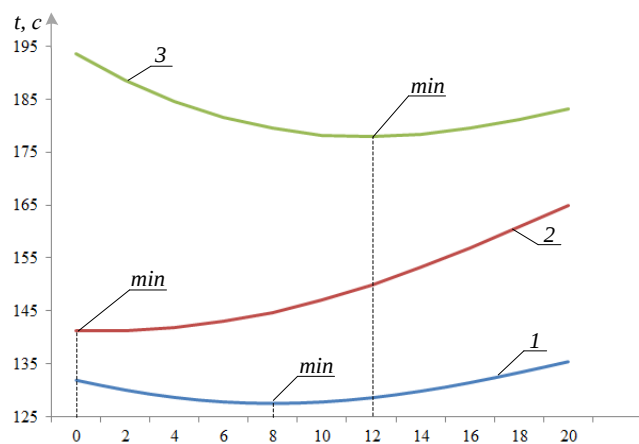


Рис. 10. Необходимые длительности работы ТЭП при изменении уровня заполнения гильзы трансформаторным маслом: 1 – принятые значения кольцевого и вертикального зазоров; 2 – увеличение кольцевого зазора на 1 мм; 3 – уве-

нены экспериментальные исследования. Определение времени, необходимого для достижения спаем ТЭП температуры, достаточной для получения удовлетворительной погрешности, проводилось в диапазоне от 400 К до 800 К на примере термопары типа L(XK). 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.

По результатам выполненных исследований сформулированы рекомендации для снижения погрешности термоэлектрических преобразователей на ТЭС. В частности, можно выделить несколько основных:

1. Тип термопары не оказывает существенного влияния на длительность выполнения измерения температуры. Тем не менее, большие значения необходимой длительности работы имеют высокотемпературные термопары (например, термопары типа ТВР и ТПП) вследствие высоких значений плотности материалов спая термопары. Следует увеличивать длительность работы таких ТЭП на 25–40 % по сравнению с наиболее распространенными термопарами типа XK, XA, XKн.
2. Зависимости минимального времени работы ТЭП при увеличении измеряемой температуры нелинейны. Значение минимально необходимой длительности измерения рекомендуется определять с использованием разработанных моделей теплопереноса.
3. Для термопар с изолированным спаем минимально необходимое время работы незначительно отличается от аналогичного показателя для термопар с неизолированным спаем (5–10 % в зависимости от измеряемой температуры). Следовательно, при планировании экспериментов или выполнении технических измерений керамический колпачок, изолирующий спай термопары, не оказывает значительное влияние на время измерений до установления стационарных значений.
4. В случае использования защитной гильзы для снижения тепловой инерции системы «защитная гильза–термоэлектрический преобразователь» рекомендуется применять метод установки ТЭП за счет припайки.
5. При выборе вещества, заполняющего защитную гильзу, для снижения тепловой инерции рекомендуется использовать сыпучие среды. Также допустимо применение термопасты или трансформаторного масла с учетом предельных (максимальных) рабочих температур указанных материалов. Иначе их использование при измерении высоких температур может привести к закипанию заполняющего гильзу материала (масло) или затвердеванию материала (теплопроводная паста).
6. На погрешность измерения температуры в числе прочих факторов оказывает влияние отвод тепла от спая к корпусу ТЭП по защитной гильзе. Для определения оптимального значения минимальной длительности выполнения измерения с учетом фактических геометрических параметров системы «тер-

моэлектрический преобразователь – защитная гильза» рекомендуется использовать разработанную модель теплопереноса.

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

Основные результаты и выводы

1. Разработан новый подход к оценке погрешностей измерений температуры в блоках, агрегатах и узлах ТЭС, отличающийся от известных применением группы моделей нестационарного теплопереноса, соответствующих алгоритмов и методов численного моделирования, и учитывающий особенности конструкций ТЭП, влияние материалов основных элементов, условий контакта с окружающей средой, температура которой измеряется.

2. Впервые разработаны физические и математические модели теплопереноса в чувствительном элементе термоэлектрического преобразователя с учетом конструкции датчика, позволяющие моделировать условия теплового контакта на ТЭС между поверхностью датчика и объектом измерения (металл турбоагрегата, коллекторов пароперегревателей парогенераторов, других агрегатов и блоков ТЭС).

3. Разработаны физические и математические модели теплопереноса в системе «защитная гильза – чувствительный элемент ТЭП», позволяющие определять интегральные характеристики процесса измерения температуры термомпарами на ТЭС, устанавливаемым в защитных гильзах с учетом уровня заполнения защитной гильзы теплопроводным материалом и типа заполняющего материала.

4. Установлено, что увеличение воздушного зазора между чувствительным элементом ТЭП и поверхностью объекта измерения более чем на 3 мм вызывает увеличение необходимой длительности работы ТЭП в 7–8 раз.

5. Необоснованно короткое (уменьшение даже на несколько секунд) время выполнения измерения температуры в условиях воздушного зазора может привести к получению ошибочных (до 15–25 %) результатов измерения.

6. Использование защитных гильз приводит к росту длительности измерений практически в 10 раз (в отдельных случаях и выше). Необходимое время определяется материалом, заполняющим гильзу, и геометрическими соотношениями «защитная гильза – ТЭП». Применение сыпучих материалов для заполнения защитных гильз может привести к снижению необходимой длительности выполнения измерения более, чем в 3 раза.

7. Уровень заполнения защитных гильз «буферным» материалом оказывает влияние на необходимую длительность выполнения измерения: излишнее заполнение (превышение рекомендованного уровня на 12 мм) может привести к увеличению длительности выполнения измерения (на 6–8 %).

8. Сформулированы рекомендации по использованию термоэлектрических преобразователей в основных блоках, агрегатах и узлах ТЭС в условиях неполного контакта с контролируемым объектом, при использовании защитных гильз и выборе заполняющего последнего материала.

Основные публикации по теме диссертации

1. **Атрошенко Ю.К.** Численное исследование интегральных характеристик теплопереноса в типичных термоэлектрических преобразователях / Ю.К. Атрошенко // Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции в 3 т., Томск, 14-18 Апреля 2014. – Томск: ТПУ, 2014 – Т. 3 – С. 127–128.
2. **Атрошенко Ю.К.** Исследование номинальных статических характеристик термоэлектрических преобразователей с различными выходными сигналами Д.С. Сивков, Ю.К. Атрошенко // Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции в 3 т., Томск, 14-18 Апреля 2014. – Томск: ТПУ, 2014 – Т. 3 – С. 175–176.
3. **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.
4. **Atroshenko Y.K.** Predictive Modelling of the Warming up Times for Thermoelectric Converters / Y.K. Atroshenko, I.P. Ozerova, P.A. Strizhak // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 1040. – P. 965-968.
5. **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.
6. **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.
7. **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.
8. **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.
9. **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.
10. **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.
11. **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.
12. **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.