

Высокоморный Владимир Сергеевич

**АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ
МИНИ-ТЭС УДАЛЕННЫХ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ
ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ РОССИИ**

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

Работа выполнена на кафедре теоретической и промышленной теплотехники ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор
Кузнецов Гений Владимирович

доктор физико-математических наук
Стрижак Павел Александрович

Официальные оппоненты: **Михайленко Сергей Ананьевич**
доктор технических наук,
профессор, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», профессор

Богомолов Александр Романович
доктор технических наук,
ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН», старший научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», г. Иваново

Защита состоится 29 ноября 2013 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при ФГБОУ ВПО «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 ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Автореферат разослан: «28» октября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.269.13
кандидат технических наук



А.С. Матвеев

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Энергоснабжение – важнейший аспект функционирования любого промышленного производства. От того, насколько стабильно и эффективно осуществляется подача необходимой для реализации технологического процесса электрической энергии, зависит производительность работы всего предприятия. Особую важность вопросы надёжности и ресурсоэффективности снабжения электрической энергией и теплом имеют для предприятий, содержащих на своём балансе удалённые от централизованной энергосистемы объекты. Зачастую единственно возможным способом подачи энергии на такие объекты является применение автономных источников энергоснабжения, как правило, мини-ТЭС. При этом предприятия, испытывающие потребность в эксплуатации удалённых объектов, сталкиваются с проблемой выбора такого автономного источника, который позволял бы в конкретных климатических условиях осуществлять энергоснабжение с максимальной надёжностью и ресурсоэффективностью (минимальными расходом топлива и временными простоями, максимальным коэффициентом полезного действия и т.д.). С этой проблемой постоянно сталкиваются компании нефтяной и газовой отраслей промышленности, организации, предоставляющие услуги связи, транспортные предприятия и другие. Проблема приобретает особую актуальность в масштабах России в связи с эксплуатацией нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» и планируемым строительством магистрального газопровода «Якутия – Хабаровск – Владивосток».

Производители мини-ТЭС, как правило, заявляют большие (нередко даже завышенные) периоды между плановыми техническими обслуживаниями и ремонтами. Предприятия же, эксплуатирующие эти источники энергоснабжения, довольно часто сталкиваются с проблемами нерегламентированных остановов энергоустановок в межобслуживаемый период. Такие технические происшествия снижают надёжность энергоснабжения удалённых объектов и их рабочего ресурса.

Сформулировать какие-либо рекомендации по повышению надёжности и ресурсоэффективности применяемых, например, на магистральных газопроводах России источников энергоснабжения – мини-ТЭС можно по результатам итерационного подбора параметров или дорогостоящих экспериментов. В настоящее время применяется только эмпирический подход (сопровождается большими временными и материальными затратами) – специалисты эксплуатирующих мини-ТЭС организаций настраивают оборудование методом проб и ошибок. Проводить реальные эксперименты на типичных мини-ТЭС не представляется возможным по ряду причин (требуется останов агрегатов, изменение режимов их работы, установка дополнительных датчиков и т.д.).

Ситуация усложняется тем, что в настоящее время информация по техническим происшествиям на таких мини-ТЭС не систематизирована. Как следствие не проанализированы возможные первопричины этих технических происшествий и влияние различных внешних и внутренних факторов на их статистику.

Цель диссертационной работы – анализ надёжности и ресурсоэффективности типичных мини-ТЭС удалённых технологических объектов газотранс-

портной системы России с применением методов математического моделирования нестационарных процессов тепломассопереноса и фазовых переходов в основных проблемных узлах и агрегатах этих энергоустановок.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Поиск информации, систематизация статистики и анализ основных (типичных) технических происшествий на мини-ТЭС удаленных технологических объектов газотранспортной системы России с выделением группы наиболее типичных, выявление их возможных первопричин.
2. Вычисление основных показателей надежности и рабочего ресурса мини-ТЭС (в частности, параметров потока отказов, интенсивности отказов и времени наработки).
3. Разработка физических и математических моделей процессов тепломассопереноса в наиболее проблемных узлах и агрегатах мини-ТЭС, соответствующих реализуемому на практике при критических технических происшествиях.
4. Выбор методов решения нестационарных нелинейных дифференциальных уравнений тепломассопереноса в частных производных. Разработка алгоритмов решения задач. Тестирование полученных моделей на адекватность.
5. Численное исследование макроскопических закономерностей и особенностей процессов тепломассопереноса и фазовых переходов в основных проблемных узлах и агрегатах мини-ТЭС.
6. Анализ влияния группы внешних (параметры рабочих потоков, конструкции основных блоков, связи между ними и другие) и внутренних (условия эксплуатации и другие) факторов на характеристики работы мини-ТЭС. Формулирование соответствующих аппроксимационных выражений.
7. Разработка прогностических моделей для оценки основных технологических параметров работы проблемных узлов и агрегатов мини-ТЭС при различных условиях эксплуатации.
8. Разработка рекомендаций по повышению показателей надежности и безаварийности работы рассматриваемых мини-ТЭС.

Научная новизна работы. Предложен новый подход к анализу причин основных технических происшествий на типичных мини-ТЭС удаленных технологических объектов газотранспортной системы России, отличающийся от известных применением математического моделирования комплекса взаимосвязанных нестационарных процессов тепломассопереноса и фазовых переходов в основных проблемных узлах и агрегатах мини-ТЭС, новых алгоритмов численного моделирования и оценки достоверности полученных результатов.

Практическая значимость работы. Разработанные физические и математические модели, алгоритмы численного решения задач тепломассопереноса используются для анализа основных технологических параметров работы типичных мини-ТЭС газотранспортной системы России при различных условиях эксплуатации (имеется акт внедрения разработанного программного комплекса на предприятии ООО «Газпром трансгаз Томск» № 12 от 30.08.2013). Сформулированные в тексте рукописи аппроксимационные выражения для определяющих параметров технологических процессов, модели и рекомендации являются основой для разработки перечня мероприятий по существенному уменьшению числа критических

технических происшествий на мини-ТЭС удаленных технологических объектов газотранспортной системы России. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ с основными программными кодами, разработанными при выполнении диссертационных исследований.

Степень достоверности результатов численных исследований. Оценка достоверности полученных в ходе исследований теоретических результатов (численного решения задач теплопереноса) проводилась проверкой консервативности используемых разностных схем. Также выполнено тестирование выбранных численных методов и разработанного алгоритма решения основной задачи теплопереноса на ряде менее сложных нестационарных нелинейных задач теплопроводности.

Связь работы с научными программами и грантами. Тема диссертации соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники Российской Федерации – «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» и критической технологии Российской Федерации «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе»

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт № 2.80.2012) и гранта ООО «Газпром трансгаз Томск» (№ 394 от 31.05.2010 г.).

Диссертационные исследования выполнены в рамках научно-технической программы «Теплофизика и теплоэнергетика» по направлению научной деятельности Национального исследовательского Томского политехнического университета «Разработка методов и средств повышения надежности и эффективности эксплуатации энергетических объектов». Основные положения диссертации используются в Национальном исследовательском Томском политехническом университете при подготовке магистров техники и технологии по направлениям «Теплоэнергетика» и «Машиностроение», а также кандидатов наук по специальностям «05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты», «05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика» и «01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты поиска и обработки информации по основным техническим происшествиям при эксплуатации типичных мини-ТЭС газотранспортной системы России, а также анализа их возможных первопричин.
2. Результаты вычислений основных показателей надежности и рабочего ресурса рассматриваемых мини-ТЭС (параметров потока отказов, интенсивности отказов и времени наработки).
3. Новый подход к анализу причин основных технических происшествий на типичных мини-ТЭС удаленных технологических объектов газотранспортной системы России, отличающийся от известных применением математического моделирования комплекса взаимосвязанных нестационарных процессов теплопереноса и фазовых переходов в основных проблемных узлах и аг-

регатах мини-ТЭС, новых алгоритмов численного моделирования и оценки достоверности полученных результатов.

4. Физические и математические модели процессов тепломассопереноса и фазовых переходов, соответствующих группе основных, реализуемых при критических технических происшествиях на конденсаторных установках мини-ТЭС.

5. Результаты численных исследований влияния основных внешних и внутренних факторов на интегральные характеристики работы конденсаторов мини-ТЭС.

6. Рекомендации по повышению показателей надежности и ресурсоэффективности рассматриваемых мини-ТЭС.

Личный вклад автора состоит в поиске и обработке информации по техническим происшествиям на типичных мини-ТЭС удаленных технологических объектов газотранспортной системы России; составлении статистики этих технических происшествий; выполнении анализа основных технических происшествий и выявлении (объяснении) их первопричин; вычислении определяющих показателей надежности и рабочего ресурса (параметра потока отказов, интенсивности отказов и времени наработки) мини-ТЭС; разработке нового подхода к анализу причин технических происшествий на рассматриваемых мини-ТЭС; формулировке физических и математических моделей основных процессов, соответствующих реализуемым на практике при критических технических происшествиях; выборе методов и разработке алгоритмов решения поставленных при выполнении работы задач; установлении основных закономерностей протекания физико-химических процессов в конденсаторах мини-ТЭС; обработке и анализе полученных результатов; разработке рекомендаций по повышению показателей надежности и ресурсоэффективности рассматриваемых источников энергоснабжения; формулировке основных выводов диссертационной работы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на XX международном технологическом конгрессе «Новые технологии газовой, нефтяной промышленности, энергетики и связи» (г. Иркутск, 2011 г.); IX всероссийской конференции «Новые технологии в газовой промышленности» (г. Москва, 2011 г.); всероссийской конференции «Химическая физика и актуальные проблемы энергетики» (г. Томск, 2012 г.); международной конференции «Энергетическое обследование как первый этап реализации концепции энергосбережения» (г. Томск, 2012 г.); XVIII всероссийской научно-технической конференции «Энергетика, эффективность, надежность, безопасность» (г. Томск, 2012 г.); IV всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (г. Томск, 2013 г.); конференции с международным участием «VIII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (г. Екатеринбург, 2013 г.); международном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» (г. Томск, 2013 г.); всероссийской конференции «Современные аспекты энергоэффективности и энергосбережения» (г. Казань, 2013 г.); XX всероссийской конференции «Структура и динамика молекулярных систем» (г. Волжск, 2013 г.); заочной конференции

«Research Journal of International Studies XVIII» (2013 г.); всероссийской конференции «Новые нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (г. Новосибирск, 2013 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в 12 печатных работах (3 статьи в журналах из списка, рекомендованного ВАК). Список основных публикаций приведён в конце автореферата.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 130 наименований, содержит 37 рисунков, 7 таблиц, 127 страниц, 1 приложение.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследований, отражена практическая значимость и научная новизна полученных результатов, связь работы с научными программами и грантами, представлены защищаемые автором положения.

Первая глава отражает современное состояние проблемы энергообеспечения удаленных от централизованного энергоснабжения технологических объектов, а также ресурсоэффективности и надежности известных автономных источников энергоснабжения таких объектов при различных климатических условиях эксплуатации. Проведен обзор основных факторов, влияющих на интегральные характеристики ресурсоэффективности, надежности и безаварийной эксплуатации типичных автономных источников энергоснабжения (мини-ТЭС). Выполнено сравнение широко используемых в газо- и нефтегазотранспортной отраслях промышленности автономных источников энергоснабжения и выделены основные проблемы их эксплуатации.

Во второй главе приведены результаты поиска и обработки информации по техническим происшествиям на типичных для газотранспортной отрасли автономных источниках энергоснабжения (рис. 1), произошедшим на основных магистральных газопроводах Дальнего Востока РФ («Камчатка» и «Сахалин-2») за период с 2008 по 2012 г. Рассмотрены условия эксплуатации 101 мини-ТЭС. Представлены методика обработки и полученные результаты формирования статистики технических происшествий, произошедших на типичных мини-ТЭС газотранспортной системы России.

На рис. 2 приведена статистика наиболее типичных аварийных технических происшествий. Установлено, что тремя основными причинами аварийных технических происшествий на рассматриваемых мини-ТЭС являются: обрыв пламени горелочного устройства, механическая неисправность турбоагрегата и предельно высокая температура в конденсаторе.

Выделенные основные (суммарно 66 %) аварийные технические происшествия (рис. 2) разделены на две группы. К первой относятся обрыв пламени горелочного и предельно высокая температура в конденсаторе – технические происшествия, последствия которых устраняются в процессе эксплуатации. Ко второй – механическая неисправность турбоагрегата, при которой требуется останов мини-ТЭС и замена соответствующего узла.

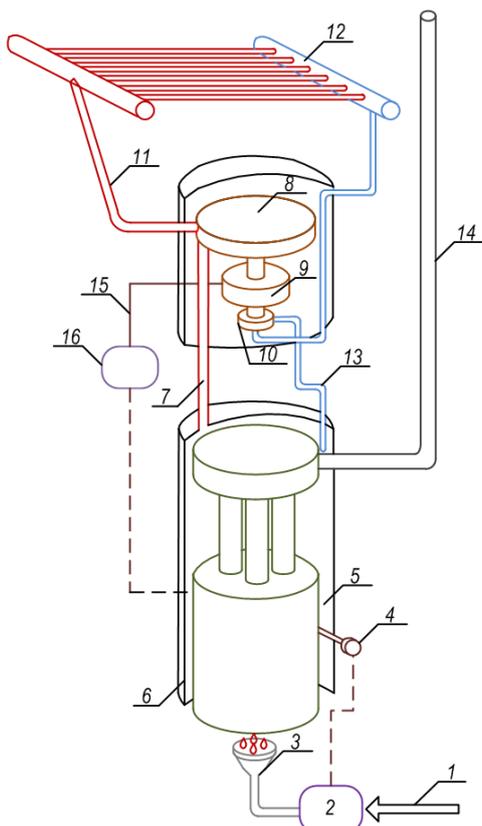


Рис. 1. Схема мини-ТЭС, работающей по замкнутому циклу пара: 1 – магистраль подвода органического топлива; 2 – панель управления подачей горючего; 3 – горелка; 4 – термостат; 5 – органическая жидкость; 6 – парогенератор; 7 – паропровод; 8 – турбина; 9 – генератор переменного тока; 10 – насос; 11 – трубка подачи пара в конденсатор; 12 – конденсатор; 13 – трубка вывода конденсата; 14 – дымовая труба; 15 – кабели входа переменного тока к выпрямителю; 16 – электрический щит

энергоснабжения – мини-ТЭС можно рекомендовать использовать вычисленные значения ω и λ в качестве справочной информации при оценке характеристик надежности и рабочего ресурса подобных (по мощности, принципу действия, условиям и режимам эксплуатации, топливу и т.д.) энергоустановок.

Для выработки мер по уменьшению значений ω и λ выполнен анализ первопричин рассматриваемых технических происшествий. Так, установлено, что в 80 % случаев обрыв пламени горелочного устройства имеет место в первый год эксплуатации энергоустановки, в момент проведения пуско-наладочных работ и настройки энергоустановки в целом. Одними из основных причин происшествия являются нестабильность подачи топлива и меняющийся компонентный состав (качество) топлива.

Для каждой из групп технических происшествий вычислены интегральные характеристики надежности мини-ТЭС за периоды до заявленных заводами-изготовителями технических обслуживаний, а также за весь период эксплуатации.

Так, например, поток отказов, произошедших в результате обрыва пламени горелочного устройства в период эксплуатации мини-ТЭС с 2008 по 2012 годы составил $\omega=0,77 \cdot 10^{-5} 1/\text{ч}$. Интенсивность отказов, произошедших в результате механической неисправности турбоагрегата в период эксплуатации мини-ТЭС с 2008 по 2012 годы, составила $\lambda=2,62 \cdot 10^{-5} 1/\text{ч}$.

Для оценки установленных значений показателей надежности выполнено их сопоставление с аналогичными параметрами для энергоблоков с паротурбинными установками различной мощности, а также транзисторами, как наиболее типичными электронными компонентами. Показано, что полученные значения λ и ω для рассматриваемых мини-ТЭС существенно превышают значения аналогичных параметров для типичных транзисторов и несколько меньше для паротурбинных установок. Это хорошо соответствует основным положениям современной теории надежности.

При отсутствии опубликованных нормативных данных о допустимых ω и λ для рассматриваемых источников автономного



Рис. 2. Статистика типичных аварийных технических происшествий

используемого органического теплоносителя – дихлорбензола.

Во вторую группу входят аварийные технические происшествия, вследствие которых отказавшее оборудование не восстанавливается (требуется полная замена). К данной группе относится, в частности, выход из строя энергоустановки из-за механической неисправности турбоагрегата.

Важно отметить, что турбоагрегат мини-ТЭС (рис. 1) со всех сторон закрыт металлическими панелями. Это существенно затрудняет его изучение. Лишь при выходе из строя и переводе агрегата на ремонт металлические панели снимаются и проводятся соответствующие работы. Появление выделенной причины, как правило, связано с неисправностью подшипников скольжения турбоагрегата (по заключению экспертов завода-изготовителя мини-ТЭС).

При проведении диссертационных исследований выявлены первопричины основных критических технических происшествий.



Рис. 3. Причины аварийного технического происшествия «обрыв пламени горелочного устройства»

для проведения мероприятий по снижению числа происшествий, связанных с этими причинами.

Предельно высокая температура рабочего тела в конденсаторе приводит к отклонению характеристик его работы от номинальных. Установлено, что это, главным образом, связано с нестабильными условиями охлаждения и достаточно сложными теплофизическими свойствами ис-

пользуемого органического теплоносителя – дихлорбензола. Так, например, в результате анализа возможных первопричин возникновения технического происшествия «обрыв пламени горелочного устройства» (с использованием материалов соответствующих экспертиз и отчетов после аварий) были определены и систематизированы наиболее типичные из них (рис. 3). Выполнен анализ выделенных первопричин и сформулированы соответствующие рекомендации

Для технических происшествий, являющихся следствием механических неисправностей турбоагрегата, установлено, что основной их причиной выступает неисправность подшипников скольжения турбоагрегата. Показано, что выход из строя подшипников главным образом связан с нерегламентной работой системы смазки. В рассматриваемых мини-ТЭС подшипники смазываются органическим теплоносителем, поступающим после охлаждения до требуемой температуры из конденсатора (рис. 1). Как следствие, параметры смазывающей подшипники турбоагрегата жидкости главным образом зависят от исправности функционирования конденсатора мини-ТЭС. В этом агрегате, в свою очередь, достаточно часто реализуется другое техническое происшествие – «предельно высокая температура в конденсаторе» (рис. 2). Так как других происшествий для конденсаторных установок не зарегистрировано, то можно сделать вывод о том, что неисправность подшипников скольжения является следствием перегрева конденсатора мини-ТЭС.

Проанализировать влияние различных внешних и внутренних факторов на режимы работы таких агрегатов мини-ТЭС (рис. 1), как турбогенератор и горелочное устройство, достаточно сложно. Мини-ТЭС, как правило, поставляются в закрытом корпусе. Контрольно-измерительных приборов на агрегатах энергисточника установлено минимальное количество (как следствие, затруднено описание стадий и режимов протекания соответствующих технологических процессов). В тоже время статистический анализ позволил установить, что при выявлении условий, при которых достигается предельно допустимая температура в конденсаторах мини-ТЭС, можно сформулировать рекомендации по ряду мероприятий для снижения числа технических происшествий, связанных с механической неисправностью турбоагрегата.

В связи с этим проведены исследования влияния на интегральные характеристики процесса конденсации рабочего тела (в частности, температуру) широкой группы внешних и внутренних условий работы этого агрегата типичной мини-ТЭС, используемой на объектах газотранспортной системы России.

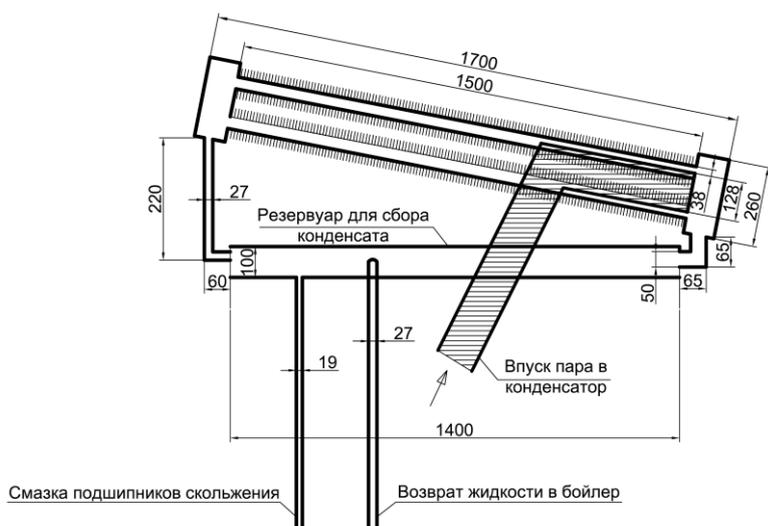


Рис. 4. Схематическое изображение типичного конденсатора мини-ТЭС

В третьей главе представлены физические и математические модели процессов теплопереноса и фазовых переходов, реализуемых в конденсаторных установках (рис. 4) типичных мини-ТЭС.

Моделировался процесс конденсации в одиночной трубке (рис. 5), характерные размеры которой (длина и диаметр) идентичны размерам трубок конденсатора, объединённых коллекторами.

При постановке задачи предполагалось, что рабочее тело (как правило, используется дихлорбензол) в парообразном состоянии при температуре T_{input} поступает в трубку конденсатора.

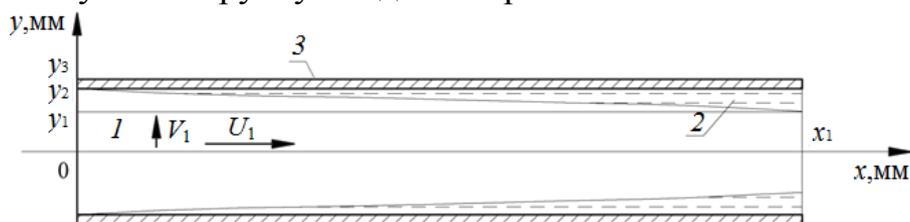


Рис. 5. Схема области решения задачи: 1 – пар; 2 – конденсат; 3 – стенка трубки конденсатора

За счёт теплоотвода через стенки трубки во внешнюю среду протекающие внутри каналов конденсатора пары дихлорбензола охлаждаются и реализуются

фазовый переход – конденсация. На внутренней поверхности трубки образуется плёнка конденсата толщиной $\delta=y_2-y_1$.

При решении задачи тепломассопереноса использована декартова система координат, начало которой совпадает с осью симметрии трубки конденсатора (рис. 5). Поперечные размеры рабочего канала составляют $y_2=19$ мм, $y_3=23$ мм. В первом приближении при достаточно больших (более 20 мм) поперечных размерах рабочих каналов представляется целесообразным использовать плоские постановки без усложнения моделей учетом пространственных эффектов и цилиндрической формы трубок конденсатора.

Численный анализ исследуемого процесса выполнен при следующих допущениях, не накладывающих существенных ограничений на общность постановки задачи:

- 1) рабочее вещество поступает в конденсатор в состоянии сухого пара при температуре насыщения, поскольку его входная температура и давление соответствуют этому состоянию;
- 2) пары дихлорбензола являются идеальным газом;
- 3) теплофизические характеристики взаимодействующих веществ не зависят от температуры. При рассматриваемых диапазонах изменения температуры теплофизические характеристики взаимодействующих веществ изменяются в пределах 15 %. Этими изменениями в первом приближении можно пренебречь.

В качестве временного интервала для вычислений основных характеристик тепломассопереноса выбиралось время движения выделенной массы пара через канал (t_1).

Сформулирована система нестационарных нелинейных дифференциальных уравнений (энергии, теплопроводности, диффузии, движения, неразрывности) в частных производных с соответствующими краевыми условиями. При описании течения пара в рабочем канале применялась модель пограничного слоя.

Для решения системы нестационарных дифференциальных уравнений, используемых при моделировании исследуемых процессов, применялись метод конечных разностей, локально-одномерный метод, метод прогонки, метод итераций.

Представлен алгоритм проверки консервативности используемой разностной схемы, примененный для оценки достоверности полученных результатов при решении системы нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных. Описан алгоритм решения основной задачи тепломассопере-

носа. Приведены результаты численного решения тестовых задач для верификации используемого алгоритма и выбранных численных методов решения основной задачи.

В четвертой главе выполнен теоретический анализ основных макроскопических закономерностей протекания процессов тепломассопереноса и фазовых переходов в конденсаторной установке мини-ТЭС. Проведено исследование влияния на условия конденсации теплоносителя группы внутренних и внешних факторов (теплофизических характеристик теплоносителя, скорости его движения, температуры наружного воздуха, условий теплообмена при воздушной и водяной системах охлаждения).

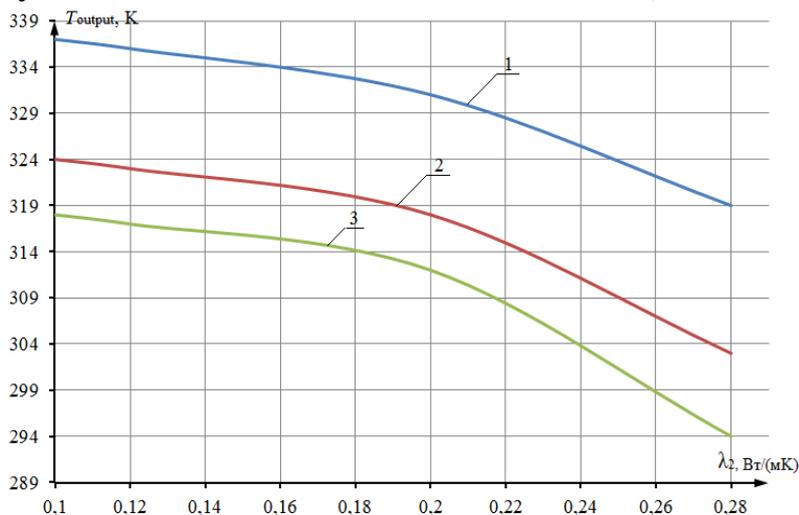


Рис. 6. Зависимости выходной температуры рабочего потока T_{output} от коэффициента теплопроводности конденсата λ_2 : 1 – $T_{\text{out}}=303$ К; 2 – $T_{\text{out}}=273$ К; 3 – $T_{\text{out}}=253$ К

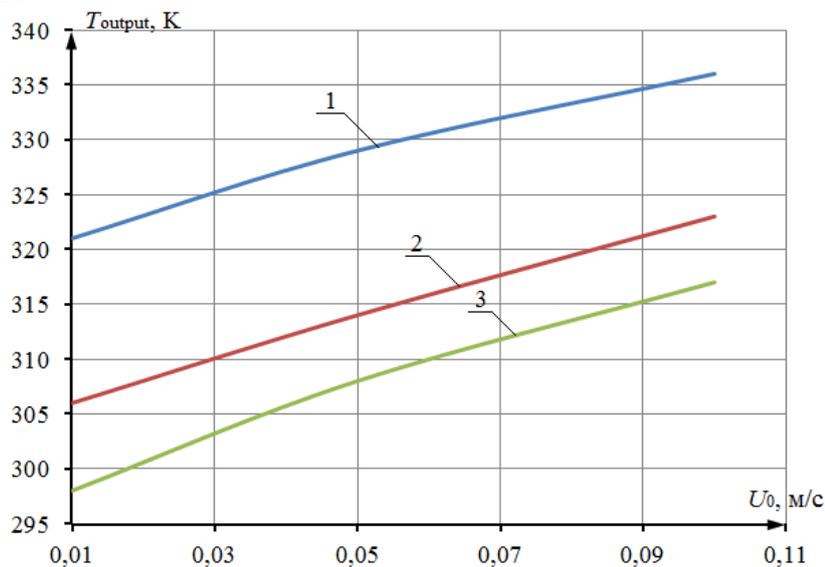


Рис. 7. Зависимости выходной температуры рабочего потока T_{output} от начальной скорости его течения в трубках конденсаторной установки U_0 : 1 – $T_{\text{out}}=303$ К; 2 – $T_{\text{out}}=273$ К; 3 – $T_{\text{out}}=253$ К

Показано (рис. 6), что теплопроводность пленки конденсата существенно влияет на его температуру на выходе из трубки конденсаторной установки (особенно при относительно высоких температурах наружного воздуха).

Также выявлено, что определяющее значение для условий охлаждения теплоносителя имеет начальная скорость его подачи в трубку конденсатора (рис. 7).

Установлено, что при увеличении начальной скорости течения пара внутри трубок конденсаторной установки от 0,01 до 0,1 м/с, выходная температура парожидкостного потока увеличивается в среднем на 20 К.

При дальнейшем повышении начальной скорости течения выходная температура потока из конденсаторной превосходит предельно допустимый уровень.

Показано (рис. 7), что при минимальных

скоростях теплоносителя обеспечиваются оптимальные условия процесса конденсации. Этот эффект объясняется тем, что при высоких скоростях течения

рабочего вещества пар и конденсат не успевают охладиться до достаточно низких температур.

Исследована эффективность нескольких систем охлаждения трубок конденсатора – воздушной и водяной (при варьировании их параметров в типичных для практики диапазонах).

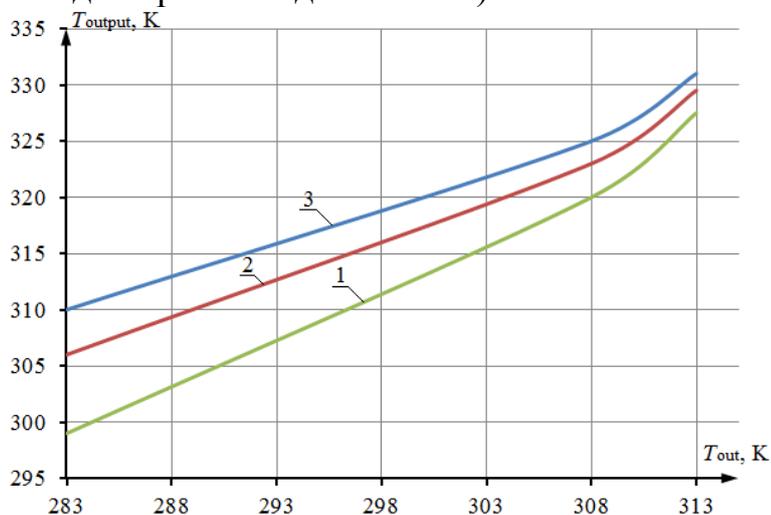


Рис. 8. Зависимости выходной температуры рабочего потока T_{output} от температуры окружающей среды T_{out} при водяном охлаждении: 1 – $\alpha_w=300$ Вт/(м²·К); 2 – $\alpha_w=200$ Вт/(м²·К); 3 – $\alpha_w=100$ Вт/(м²·К)

Установлено, что водяная система охлаждения позволяет более эффективно отводить тепло от трубок конденсатора (рис. 8), чем воздушная.

Выявленные зависимости выходной температуры конденсата от температуры наружной среды при воздушном охлаждении с коэффициентом теплообмена $\alpha_a=10–30$ Вт/(м²·К) позволили объяснить типичные технические происшествия в конденсаторах в летнее время (несмотря на использование на промышленных объектах воздушных вентиляторов с обеспечением приведенных α_a).

Также проанализированы интегральные характеристики конденсации предлагаемого рядом заводов-изготовителей альтернативного дихлорбензолу органического теплоносителя – полидиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-5. Показано, что при использовании этого теплоносителя основные технологические процессы в конденсаторах мини-ТЭС протекают при более высокой по сравнению с дихлорбензолом температуре. Как показал анализ, этот фактор отрицательно сказывается на работе не только конденсаторной установки, но и смазываемых конденсатом подшипников скольжения турбогенератора.

Исследовано влияние условий теплопереноса в межтрубном пространстве на выходную температуру конденсата.

Установлено, что температура между трубками существенно отличается от температуры наружного воздуха. При этом с уменьшением расстояния между трубками влияние этого фактора на интегральные характеристики конденсации усиливается экспоненциально (рис. 9).

Так как для рассматриваемой мини-ТЭС (рис. 1) конденсаторы включают два расположенных друг над другом ряда из 16 трубок, то в реальной практике их взаимное влияние более существенно, чем представлено на рис. 9. В соответствии с имеющимися ограничениями по размерам энергоустановки предложены минимально допустимые расстояния между трубками ($L=6$ мм).

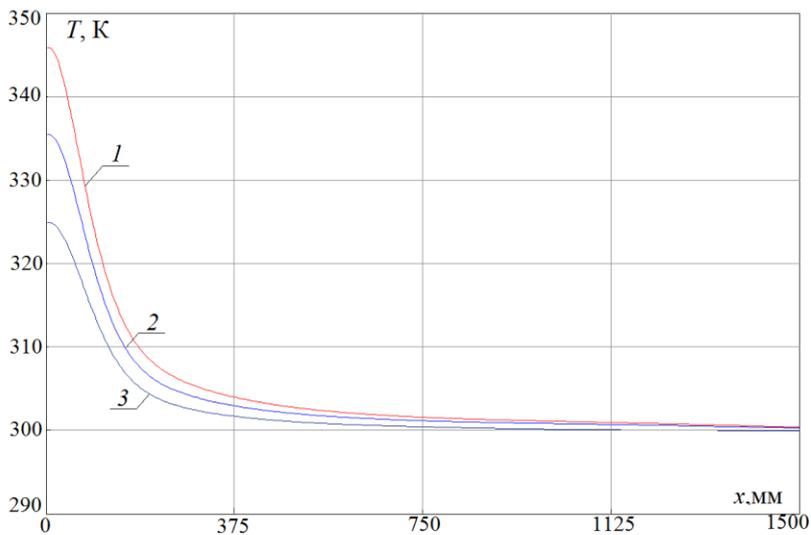


Рис. 9. Распределения температуры внешней среды в межтрубном пространстве (на оси симметрии) при $T_{out}=303$ К: 1 – $L=6$ мм; 2 – $L=9$ мм; 3 – $L=12$ мм

использованию полученных результатов и развитию сформулированных положений. Так, например, результаты численных исследований являются основой для анализа интегральных характеристик надежности и рабочего ресурса широкой группы мини-ТЭС, работающих в режиме когенерации (не только на газо- и нефтепроводах). Возможно применение разработанных моделей тепломассопереноса для агрегатов мини-ТЭС с различными условиями теплообмена и теплоносителями.

Сформулированный в диссертации подход к выявлению причин технических происшествий в работе конденсаторных установок мини-ТЭС, основанный на математическом моделировании физико-химических процессов и фазовых переходов, можно использовать при объяснении всех остальных причин технических происшествий на мини-ТЭС (рис. 2). Для этого необходимы исходные данные от заводов-изготовителей мини-ТЭС о технологических процессах, реализуемых в основных агрегатах с номинальными значениями рабочих параметров, или установка дополнительных датчиков для измерения этих параметров в нескольких контрольных точках рабочего тракта.

Вычисленные значения интегральных характеристик надежности и рабочего ресурса мини-ТЭС можно использовать в качестве номинальных для сравнения с другими источниками электрической энергии при выборе систем автономного энергоснабжения.

В заключении подведены основные итоги выполненных исследований и обобщены теоретические следствия.

Основные результаты и выводы

1. Впервые проведены сбор и обработка информации по техническим происшествиям на мини-ТЭС удаленных технологических объектов газотранспортной системы России. Также выполнен анализ наиболее типичных происшествий.

По результатам выполненных численных исследований сформулированы аппроксимационные выражения для зависимостей T_{output} от теплофизических характеристик теплоносителя, скорости его движения, температуры наружного воздуха, условий теплообмена при воздушной и водяной системах охлаждения.

Также в тексте рукописи представлены рекомендации по использованию

2. Впервые рассчитаны основные показатели надежности и рабочего ресурса мини-ТЭС (параметр потока отказов, интенсивность отказов и время наработки). Установленные значения можно считать номинальными для рассматриваемых агрегатов, так как в настоящее время нет информации о нормативных значениях этих параметров.
3. Сформулированы причины критических технических происшествий на основных узлах и агрегатах мини-ТЭС.
4. Предложен новый подход к анализу причин технических происшествий с применением математического моделирования комплекса взаимосвязанных физико-химических процессов и фазовых переходов в основных агрегатах мини-ТЭС.
5. Разработаны физические и математические модели основных процессов, соответствующих реализуемым в конденсаторах мини-ТЭС при критических технических происшествиях.
6. Выполнена верификация моделей тепломассопереноса на базе разработанного алгоритма оценки консервативности используемых разностных схем и решения группы тестовых задач.
7. Численно исследовано влияние группы внешних (параметры рабочих потоков, конструкции основных блоков, связи между ними и другие) и внутренних (условия эксплуатации и другие) факторов на параметры работы основных агрегатов мини-ТЭС.
8. Сформулированы аппроксимационные выражения для зависимостей интегральных параметров работы агрегатов мини-ТЭС от исследованных процессов и факторов.
9. Разработаны прогностические модели для оценки основных технологических параметров работы агрегатов мини-ТЭС при различных условиях эксплуатации. Получен акт внедрения этих моделей на предприятии ООО «Газпром трансгаз Томск». Имеются три свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.
10. Разработаны рекомендации по повышению показателей надежности и ресурсоэффективности типичных мини-ТЭС, работающих в режиме когенерации.

Основные публикации по теме диссертации

1. **Высокоморный, В.С.**, Сярг Б.А. Реализация инновационных технологий энергообеспечения автономных объектов газотранспортной системы / В.С. Высокоморный, Б.А. Сярг // Новые технологии газовой, нефтяной промышленности, энергетики и связи: Труды XX междун. технол. конгресса. – Москва: Акад. технол. наук РФ, 2012. – С. 164–168.
2. **Высокоморный, В.С.** Повышение надежности энергообеспечения удаленных объектов транспорта нефти и газа путем использования автономных источников энергоснабжения // Энергетическое обследование как первый этап реализации концепции энергосбережения: Материалы международной конференции. Томск: НИ ТПУ. 2012, – С. 190–192.

3. **Высокоморный, В.С.** Энергообеспечение автономных объектов газотранспортной системы // Химическая физика и актуальные проблемы энергетики. Томск: НИ ТПУ, 2012. – С. 64–65.
4. **Высокоморный В.С.** Анализ интегральных характеристик надежности работы автономных источников энергоснабжения удаленных линейных объектов Единой системы газоснабжения / О.В. Высокоморная, В.С. Высокоморный, П.А. Стрижак // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2013. – № 3. – С. 139–148.
5. **Высокоморный, В.С.** Анализ причин аварийных технических происшествий на автономных источниках энергоснабжения удаленных объектов Единой системы газоснабжения России / О.В. Высокоморная, В.С. Высокоморный, П.А. Стрижак // Энергетик, 2013. – № 3. С. 31–35.
6. **Высокоморный, В.С.** Оценка параметров надежности работы автономных устройств энергоснабжения удаленных линейных объектов магистральных газопроводов Восточной Сибири и Дальнего Востока / О.В. Высокоморная, В.С. Высокоморный, П.А. Стрижак // Известия Томского Политехнического университета, 2013. – № 4. – С. 38–42.
7. **Высокоморный, В.С.** Численное исследование влияния параметров рабочей среды на интегральные характеристики работы конденсаторной установки автономных источников энергоснабжения / О.В. Высокоморная, В.С. Высокоморный, П.А. Стрижак // НИ ТПУ. Томск, 2013. 23 с. Деп. в ВИНТИ 16.09.2013, – № 258–В2013.
8. **Высокоморный, В.С.** Анализ влияния условий охлаждения рабочего двухфазного потока в конденсаторах источников автономного энергоснабжения / О.В. Высокоморная, В.С. Высокоморный, П.А. Стрижак // НИ ТПУ. Томск, 2013. 18 с. Деп. в ВИНТИ 16.09.2013, – № 257–В2013.
9. **Высокоморный, В.С.** Программа расчета интегральных характеристик конденсаторной установки, работающей по органическому циклу Ренкина / В.С. Высокоморный, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619264. Бюлл. прогр. – 2013. – № 2.
10. **Высокоморный, В.С.** Программа расчета характеристик конденсаторной установки с принудительным водяным охлаждением, используемой на автономных источниках энергоснабжения / В.С. Высокоморный, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619339. Бюлл. прогр. – 2013. – № 2.
11. **Высокоморный, В.С.** Программа расчета характеристик конденсации в узлах охлаждения различной конструкции / В.С. Высокоморный, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619382. Бюлл. прогр. – 2013. – № 2.
12. **Высокоморный, В.С.** Комплексный подход к повышению надёжности работы автономных источников энергоснабжения удалённых линейных объектов единой системы газоснабжения России / Высокоморная О.В., Высокоморный В.С., Стрижак П.А. // Теплофизические основы энергетических технологий: сборник научных трудов IV Всероссийской научной конференции с международным участием. Томск: НИ ТПУ, 2013. – С. 70–73.

Подписано в печать 24.10.2013 г.
Формат А4/2. Ризография
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 11/10-13
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а

