

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научные руководители:
доктор физико–математических наук,
профессор Кузнецов Г.В.,
доктор физико–математических наук
Стрижак П.А.

Томск – 2013

СОДЕРЖАНИЕ

	С.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСООЭФФЕКТИВНОСТИ МИНИ–ТЭС УДАЛЕННЫХ ОТ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ.....	20
Выводы по первой главе.....	28
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ И РАБОЧЕГО РЕСУРСА МИНИ–ТЭС УДАЛЕННЫХ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ РОССИИ.....	30
2.1. Описание принципа действия мини–ТЭС.....	30
2.2. Статистика технических происшествий.....	33
2.3. Вычисление основных показателей надежности и рабочего ресурса	39
2.4. Анализ первопричин основных технических происшествий.....	42
2.4.1. Обрыв пламени горелочного устройства.....	42
2.4.2. Механическая неисправность турбоагрегата.....	48
2.4.3. Предельно высокая температура в конденсаторе.....	50
Выводы по второй главе.....	51
ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО РАБОЧЕГО ТЕЛА В КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ МИНИ–ТЭС.....	52
3.1. Описание принципа действия и режимов работы конденсаторной установки мини–ТЭС, работающей по замкнутому циклу пара.....	53
3.2. Физическая постановка задачи.....	57
3.3. Математическая модель.....	59
3.4. Методы решения.....	62

3.5. Решение уравнений энергии и теплопроводности.....	62
3.6. Решение уравнения диффузии.....	65
3.7. Решение уравнений движения и неразрывности.....	66
3.8. Алгоритм решения задачи тепломассопереноса при конденсации органического рабочего вещества в замкнутом цикле мини-ТЭС	67
3.9. Оценка достоверности полученных результатов.....	69
3.10. Решение тестовых задач.....	71
3.10.1. Одномерный теплоперенос в плоской бесконечной пластине с фазовым переходом на границе.....	71
3.10.2. Одномерный теплоперенос в плоской двухслойной бесконечной пластине.....	74
3.10.3. Двумерный теплоперенос в однородной пластине.....	76
3.10.4. Двумерный теплоперенос в пластине с фазовым переходом на двух границах.....	78
Выводы по третьей главе.....	81
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ МИНИ–ТЭС.....	82
4.1. Анализ влияния параметров рабочей среды на интегральные характеристики функционирования конденсаторной установки	82
4.2. Влияние условий охлаждения органического рабочего вещества на интегральные характеристики функционирования конденсаторной установки	89
4.3. Анализ влияния теплофизических характеристик органических рабочих веществ на интегральные характеристики функционирования конденсаторной установки.....	95

4.4. Оценка взаимного влияния нескольких трубок конденсаторной установки на параметры рабочего потока	100
4.5. Рекомендации по использованию полученных результатов.....	104
Выводы по четвертой главе.....	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	108
ЛИТЕРАТУРА.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	123

ВВЕДЕНИЕ

Энергоснабжение (особенно электрической энергией) – важнейший аспект функционирования любого промышленного производства [1–3]. 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 [3–5]. 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.). В частности, с этой проблемой нередко 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» [6, 7].

Компании перечисленных выше отраслей промышленности эксплуатируют большое количество удалённых от централизованного энергоснабжения объектов различной мощности. В большинстве случаев установленная мощность эксплуатируемых объектов составляет от 1000 Вт до 10 кВт. Определяющее значение имеет удалённость объектов от

населенных пунктов и необходимость оперативного принятия решений при возникновении сбойных ситуаций в работе систем выработки электрической энергии и тепла.

Важно также отметить, что рассматриваемые технологические объекты достаточно часто расположены в непосредственной близости от территории природоохранных зон, что обуславливает необходимость дополнительного контроля вредных воздействий на окружающую среду.

Проведение линий электропередачи в такие районы чаще всего экономически нецелесообразно [8–10]. Не менее значимо и то обстоятельство, что сооружение и обслуживание вдольтрассовых линий электропередачи сопровождаются негативным воздействием на окружающую среду.

Для бесперебойного снабжения удаленных объектов электрической энергией и теплом используемые энергоустановки – мини-ТЭС должны отвечать большому количеству требований. К основным можно отнести следующие [4–6]:

1. Устойчивость работы мини-ТЭС при минимальных и максимальных электрических нагрузках. Производительность мини-ТЭС, в первую очередь, зависит от требуемой объектом электрической нагрузки (доля выработки тепловой энергии составляет, как правило, менее 10 % относительно электрической). Удаленные объекты в большинстве случаев имеют переменные электрические нагрузки, изменяющиеся со временем года и суток, определенными плановыми или внеплановыми работами. Большинство энергоустановок инерционны при изменении нагрузок, что может привести к появлению сбойных ситуаций в работе удаленного объекта, и как следствие, возникновению внештатных происшествий на данном участке магистрального газопровода, нефтепровода, линии связи и т.д.

2. Соответствие фактической длительности межремонтных периодов и периодов между плановыми техническими обслуживаниями

мини-ТЭС, заявляемыми производителем. Производители эксплуатируемых в газотранспортной системе России мини-ТЭС нередко заявляют значительно отличающиеся периоды между плановыми техническими обслуживаниями, а также текущими и капитальными ремонтами [6, 7]. Если усреднить эти величины, то период между плановыми техническими обслуживаниями составляет около 1 года (6200 (маш). ч). Время работы энергоустановок между текущими ремонтами составляет около 3 лет (18600 (маш). ч), а время работы между капитальными ремонтами – 6 лет (37200 (маш). ч). Соблюдение всех вышеперечисленных периодов эксплуатации связано, в первую очередь, с условиями работы мини-ТЭС (качество топлива, температура окружающей среды и т.д.) [2–4].

В случае невыполнения заявленных заводами-изготовителями плановых периодов по техническому обслуживанию и ремонту может произойти внештатная ситуация (сбой) в энергообеспечении удаленных объектов. Ситуация может быть осложнена тем, что зачастую сезонная доступность к удаленным объектам не позволяет в момент технического происшествия оперативно добраться до места аварии. Кроме того, закрытость информации некоторых заводов-изготовителей, выпускающих используемые для автономного энергоснабжения мини-ТЭС, не позволяет специалистам эксплуатирующих компаний произвести внеплановое техническое обслуживание.

3. *Возможность поддержания оптимального соотношения вырабатываемых мини-ТЭС электрической и тепловой энергий в когенерационном режиме.* Известно [10–17], что режим когенерации (совместной выработки тепловой и электрической энергии) осуществляется при более высоком относительно отдельной выработки коэффициенте полезного действия мини-ТЭС. Одним из важнейших требований к работе энергоустановок является возможность поддержания оптимального соотношения вырабатываемых электрической и тепловой энергий в когенерационном режиме. Процесс когенерации для энергоснабжения

удаленных объектов особенно актуален. Это связано с необходимостью одновременной выработки электрической и тепловой энергии. Электрическая энергия необходима для функционирования в основном технологического оборудования. Тепловая энергия требуется для поддержания рабочих температурных условий на объекте в зимний период. Тепловая энергия необходима для теплоснабжения блок-боксов, в которых располагается основное и вспомогательное оборудование энергоустановок. Кроме того, при присутствии обслуживающего персонала на объекте необходимо обеспечивать тепловую нагрузку на коммунально-бытовые нужды рабочих. Возможность обеспечения выработки энергии для нужд теплоснабжения без установки дополнительного отопительного оборудования, которое повлекло бы за собой необходимость в организации места для его размещения, а также внесения изменений в технологический процесс, является обязательным условием при выборе источника автономного энергоснабжения.

Можно также отметить, что, например, удалённые объекты единой системы газоснабжения России располагаются в основном на территориях со сложными климатическими условиями, что также подтверждает необходимость применения энергоисточников с совместной выработкой тепловой и электрической энергии – мини–ТЭС.

Также необходимо отметить, что помимо проблемы теплоснабжения в зимний период, когда температура наружного воздуха может снижаться до $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, в летний период существует необходимость охлаждения оборудования во избежание его перегрева и выхода из строя в связи с возможным единовременным повышением температуры наружного воздуха до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. *Надежность работы мини–ТЭС.* Несмотря на то, что производители мини–ТЭС, как правило, заявляют большие (нередко даже завышенные) периоды между плановыми техническими обслуживаниями и ремонтами [6, 7], предприятия, эксплуатирующие эти источники энергоснабжения, довольно часто сталкиваются с проблемами

нерегламентированных остановов энергоустановок в межобслуживаемый период [10]. Такие технические происшествия снижают надежность энергоснабжения удаленных объектов и их рабочего ресурса, а также могут привести к возникновению аварийных ситуаций в ходе всего технологического процесса компании, на балансе которой находятся удаленные объекты. При этом нередко приходится выполнять резервирование источников энергии, что приводит к увеличению себестоимости вырабатываемой энергии и другим соответствующим последствиям [11].

Условно все аварийные технические происшествия на промышленных агрегатах [18, 19] можно разделить на две группы. К первой группе относятся происшествия, последствия которых устраняются в условиях эксплуатации соответствующего оборудования, во вторую группу входят такие, вследствие которых отказавшее оборудование не восстанавливается (требуется полная замена). Для первой группы основным показателем надежности является параметр потока отказов $\omega(t)$, а для второй интенсивность отказов $\lambda(t)$ [18, 19].

В результате выполнения анализа зарегистрированных технических происшествий на рассматриваемых энергоустановках можно определить типичные аварийные технические происшествия, а также основные причины их возникновения. Кроме того, для оценки надёжности и рабочего ресурса энергоустановок необходимо вычислить значения основных интегральных характеристик надежности и безаварийности работы рассматриваемых мини–ТЭС (интенсивность отказов $\lambda(t)$, поток отказов $\omega(t)$ и наработка на отказ T_0). На основе полученных результатов можно сформулировать рекомендации, направленные на повышение надежности и рабочего ресурса мини–ТЭС, предназначенных для энергоснабжения удаленных линейных объектов.

5. *Адаптация мини–ТЭС к индивидуальным условиям эксплуатации.*

В связи с тем, что мини–ТЭС в основном производятся серийным способом, принятые заводами-изготовителями в качестве номинальных условия

эксплуатации усреднены, независимо от географического расположения энергоустановки и условий эксплуатации. Зачастую эти условия достаточно плохо коррелируют с реальными на территории России, в том числе вследствие того, что подавляющее большинство автономных энергоустановок проектируется за рубежом.

В связи с этим в большинстве случаев настройку (адаптацию) мини-ТЭС под определенные условия эксплуатации выполняют специалисты компаний, эксплуатирующих эти энергоустановки [6, 7]. Использовать для обслуживания специализированные сервисные компании не всегда целесообразно, так как в России очень мало аккредитованных иностранными заводами-изготовителями компаний. Стоимость технического обслуживания мини-ТЭС специализированными сервисными компаниями весьма велика. Кроме того, географически объекты, нуждающиеся в автономном энергоснабжении, в основном расположены на значительном удалении от населённых пунктов, что затрудняет своевременный доступ к ним сервисных бригад в случае какого-либо технического происшествия.

Основное количество сбоев и технических происшествий в работе рассматриваемых мини-ТЭС [6, 7] связано с неподготовленностью энергоустановок к эксплуатации в сложных климатических условиях (с изменяющейся сезонно температурой наружного воздуха от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$). Количество технических происшествий уменьшается по мере оптимизации технологического процесса, внесения изменений в конструкцию агрегатов или мини-ТЭС в целом, а также настройки параметров работы энергоустановки под конкретные условия эксплуатации.

Анализ ежегодных отчетных комплектов документации по эксплуатируемым мини-ТЭС на магистральных газопроводах России [20–22] показывает, что многие из выше перечисленных требований выполняются частично или вовсе не выполняются на практике. Как следствие, достаточно часто возникают перебои с подачей, в первую очередь, электрической

энергии на удаленные линейные объекты газопроводов и поддержанием стабильных параметров работы транспортирующей системы в целом.

Сформулировать какие-либо рекомендации по повышению надежности и рабочего ресурса (ресурсоэффективности) применяемых 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 [6, 7]. Проводить реальные эксперименты на таком дорогостоящем оборудовании, как типичные мини-ТЭС [2–4], 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 наиболее типичным техническим происшествиям не собрана, не обработана и не систематизирована. Как следствие, не выделены группы критических технических происшествий. Не проанализированы возможные первопричины этих технических происшествий и влияние различных внешних и внутренних факторов на их статистику.

Представляется целесообразным собрать, обработать и систематизировать информацию по основным техническим происшествиям на типичных мини-ТЭС удаленных технологических объектов газотранспортной системы России, вычислить интегральные показатели надежности и рабочего ресурса источников энергии, разработать новый подход к анализу причин технических происшествий с применением математического моделирования комплекса взаимосвязанных нестационарных физико-химических процессов и фазовых переходов в основных агрегатах мини-ТЭС, выполнить численные исследования, сформулировать возможные причины основных технических происшествий

и разработать рекомендации по повышению интегральных показателей надежности и рабочего ресурса рассматриваемых мини–ТЭС.

Целью работы является анализ надежности и ресурсоэффективности типичных мини–ТЭС, используемых на удаленных технологических объектах газотранспортной системы России, при помощи математического моделирования комплекса нестационарных процессов тепломассопереноса и фазовых переходов в основных 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 реализуемым 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 агрегатах мини–ТЭС, новых алгоритмов численного моделирования и оценки достоверности полученных результатов.

Практическая значимость. 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 [23]). 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 [24–26].

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

Связь работы с научными программами и грантами.

Тема диссертации соответствует приоритетному направлению развития науки и техники в Российской Федерации – «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика».

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».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты поиска и систематизация информации по основным техническим происшествиям при эксплуатации типичных мини-ТЭС

газотранспортной системы России, а также анализа их возможных первопричин.

2. Результаты определения 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 тепломассопереноса и фазовых переходов в основных агрегатах 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 систематизации 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 результаты, сформулированные положения и теоретические следствия диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. XX международный технологический конгресс «Новые технологии газовой, нефтяной промышленности, энергетики и связи», г. Иркутск, 2011 г.
2. IX всероссийская конференция «Новые технологии в газовой промышленности», г. Москва, 2011 г.
3. Всероссийская конференция «Химическая физика и актуальные проблемы энергетики», г. Томск, 2012 г.
4. Международная конференция «Энергетическое обследование как первый этап реализации концепции энергосбережения», г. Томск, 2012 г.
5. XVIII всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика, эффективность, надежность, безопасность», г. Томск, 2012 г.
6. IV всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 2013 г.
7. Конференция с международным участием «VIII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике», г. Екатеринбург, 2013 г.

8. Международный форум «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск, 2013 г.
9. Всероссийская конференция «Современные аспекты энергоэффективности и энергосбережения», г. Казань, 2013 г.
10. XX всероссийская конференция «Структура и динамика молекулярных систем», г. Волжск, 2013 г.
11. Заочная конференция «Research Journal of International Studies XVIII», 2013 г.
12. Всероссийская конференция «Новые нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», г. Новосибирск, 2013 г.

Публикации. Основные положения и результаты диссертационных исследований опубликованы в 12 печатных работах, в том числе 3 – в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Энергетик», «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета», «Известия Томского политехнического университета».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 37 рисунков, 7 таблиц, 1 приложение. Библиография включает 118 наименований.

Краткое содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследований, отражена практическая значимость и научная новизна полученных результатов.

В первой главе отражается 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 безаварийности эксплуатации типичных автономных источников энергоснабжения. Выполнено сравнение широко используемых в газо- и нефтетранспортной 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 (мини-ТЭС), произошедшим на основных магистральных газопроводах Дальнего Востока РФ («Камчатка» и «Сахалин-2») за период с 2008 по 2012 г. Представлены разработанная автором методика обработки и полученные результаты формирования статистики технических происшествий, произошедших на типичных мини-ТЭС газотранспортной системы России. Выявлены первопричины критических технических происшествий. Вычислены основные показатели надежности и рабочего ресурса (параметр потока отказов, интенсивность отказов и время наработки) источников энергоснабжения. При анализе первопричин технических происшествий сделан вывод о целесообразности разработки физических и математических моделей для анализа работы основных проблемных узлов и агрегатов мини-ТЭС.

В результате составления, обработки и анализа статистики выделены три основные группы технических происшествий на рассматриваемых мини-ТЭС: обрыв пламени горелочного устройства (21 % от общего числа), механическая неисправность турбоагрегата (25 %) и предельно высокая температура в конденсаторе (20 %). Описаны основные процессы, реализующиеся при перечисленных технических происшествиях. Показано, что для первых двух групп технических происшествий трудно провести даже некоторый приближенный анализ вследствие минимального количества исходных данных. Горелочные устройства и турбоагрегат закрыты для изучения и оборудуются, как правило, минимальным числом датчиков). При

рассмотрении третьей группы происшествий сделан вывод о возможности и целесообразности численного моделирования процессов тепломассопереноса и фазовых переходов в конденсаторной установке типичной мини–ТЭС, используемой на удаленных технологических объектах газотранспортной системы России.

В третьей главе представлены физические и математические модели процессов тепломассопереноса и фазовых переходов, реализуемых в конденсаторных установках типичных мини–ТЭС. Приведено описание методов решения системы нестационарных нелинейных дифференциальных уравнений, используемых при моделировании исследуемых процессов. Рассмотрен алгоритм проверки консервативности разностной схемы, примененный для оценки достоверности полученных результатов при решении системы нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных. Описан алгоритм решения основной задачи тепломассопереноса. 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. Приведены основные результаты численных исследований, в частности, зависимости выходных параметров теплоносителя от температуры наружного воздуха, скорости его движения, условий теплообмена и других факторов. Проведен анализ влияния на условия конденсации теплоносителя группы внутренних и внешних факторов. Разработаны рекомендации по использованию полученных результатов и положений, а также развитию сформулированных теоретических следствий.

В заключении подведены основные итоги диссертационных исследований, а также сформулированы соответствующие выводы.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ МИНИ-ТЭС УДАЛЕННЫХ ОТ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

На протяжении последних лет достаточно много внимания уделяется проблемам эксплуатации автономных энергоустановок разного типа, используемых для снабжения удаленных от централизованных сетей технологических объектов. Можно выделить, например, группу обзорных публикаций [27–29].

Одним из путей решения проблемы автономного энергоснабжения удалённых объектов может быть применение установок, использующих возобновляемые или нетрадиционные источники энергии. Вопросы применения энергоустановок, работающих от нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (в частности, энергии Солнца и ветра) рассмотрены в достаточно большом количестве работ, например, [27–41]. Показано [27–41], что на основной части территории России возможно применение как солнечных панелей, так и ветроэнергетических устройств. Однако при типичных для России сложных и резко меняющихся климатических условиях использование таких источников малоэффективно (обеспечиваемые нагрузки крайне нестабильны) [1–4].

Достаточно перспективными с точки зрения эффективности и автономности источниками энергоснабжения являются получающие всё большее распространение энергоустановки на основе электрохимических реакций [42–51]. Отличительной особенностью таких источников энергии является прямое преобразование химической энергии топлива в электрическую энергию. Наибольшее распространение такие энергоустановки [42–51] получили в трех регионах: Северной Америке (США, Канада), Западной Европе (Германия, Италия, Великобритания) и Юго-Восточной Азии (Япония, Южная Корея, Китай).

Несмотря на большое число типов топливных элементов, интерес с точки зрения практического применения представляют лишь несколько, а именно, низкотемпературные топливные элементы со свободным и связанным щелочным электролитом и топливные элементы с твердополимерной ионообменной мембраной (например, [45]). Цена непосредственно такой энергоустановки довольно велика вследствие необходимости применения либо чистого водорода, либо дорогих и сложных в производстве катализаторов и электролита. Также к недостаткам вышеописанных энергетических установок можно отнести невозможность их использования в качестве основного источника энергообеспечения в случае комбинирования с нетрадиционными и возобновляемыми источниками энергии из-за необходимости использования в качестве веществ, вступающих в реакцию, водорода и кислорода, обеспечить запас которых на удалённых объектах промышленных предприятий достаточно сложно.

Кроме того, до настоящего времени нет достаточного количества статистических данных о надёжности работы таких источников энергии в сложных климатических условиях на территории России, что затрудняет их применение на объектах 1 и 2 категории электроснабжения, к которым в большинстве случаев относятся удаленные объекты предприятий транспорта углеводородов. Во многом по указанным причинам электрохимические источники энергии в России до настоящего времени широкого применения не нашли и используются локально [45–51].

Выше названные проблемы послужили причиной достаточно интенсивных исследований в направлении создания автономных источников энергоснабжения, работающих на органическом топливе (например, нефть или природный газ), в первую очередь, мини-ТЭС [27–29].

О целесообразности такого способа организации энергообеспечения объектов, удалённых от централизованной энергосистемы, можно судить исходя из наличия на территории России достаточного запаса органического топлива, а также преобладания среди автономных энергопотребителей

линейных объектов предприятий, транспортирующих нефть и природный газ [52–55].

В настоящее время в нефтяной и газовой отраслях промышленности России работает большое количество мини–ТЭС на органическом топливе различного исполнения и принципов действия, например, установки [56–78]: с газотурбинным двигателем; на базе роторно-лопастного двигателя с внешним подводом теплоты и вентильного двигателя с постоянными магнитами; с замкнутым циклом и с внешним подводом тепла; на базе газопоршневых двигателей; микротурбины; паротурбогенераторы с замкнутым циклом; дизельгенераторы.

Наиболее часто используемыми для автономного энергоснабжения (в частности, для энергоснабжения линейных объектов газотранспортных предприятий на территории Сибири и Дальнего Востока РФ (рис. 1.1)) являются микротурбины компании «Capstone Turbine Corporation» [79], мини–ТЭС на основе преобразователя энергии Стирлинга компании «Cleanergy» [80] и мини–ТЭС с замкнутым циклом компании «Ormat» [81].



Рисунок 1.1. Схема основных магистральных газопроводов Сибири и Дальнего Востока РФ

Для каждого из перечисленных источников энергоснабжения можно выделить группу недостатков, установленных в процессе эксплуатации на территории России в районах с разными климатическими условиями.

Мини-ТЭС на основе газовой микротурбины компании «Capstone Turbine Corporation» (рис. 1.2) имеет в своём составе всего одну движущуюся деталь – вращающийся вал, на котором соосно расположены электрический генератор, компрессор и непосредственно турбина [79].



Рисунок 1.2. Внешний вид микротурбины «Capstone»

В установке (рис. 1.2) не используются редукторы или другие механические приводы [79]. Уникальной конструктивной особенностью двигателя является применение воздушных подшипников, что дает возможность отказаться от использования масла. Низкие рабочие температуры снижают уровень эмиссии окислов азота, благодаря чему микротурбины этого производителя можно отнести к одному из наиболее экологически чистых источников генерации.

Благодаря использованию воздухо-воздушного теплообменника в конструкции турбодвигателя (рис. 1.2), микротурбины имеют высокий для

турбогенераторов [79] электрический коэффициент полезного действия (КПД) – до 35 %. Рекуператор использует тепловую энергию выхлопа для предварительного нагрева воздуха в камере сгорания, что позволяет снизить объем потребляемого топлива практически в два раза.

Несмотря на перечисленные достоинства микротурбин «Capstone», их использование на объектах транспорта углеводородов затруднено эксплуатационной необходимостью частого изменения объема транспортируемого сырья. Изменение расхода перекачиваемых углеводородов требует изменения вырабатываемой электрической мощности в широком диапазоне, что в случае применения газовых микротурбин приводит к значительному снижению КПД энергоустановки относительно номинального режима эксплуатации [10].

Мини-ТЭС компании «Cleanergy» [80] оснащены специальной системой беспламенного окисления, что позволяет возвращать основную долю отработавших газов в камеру сгорания и значительно снижать содержание вредных веществ в выхлопах от энергоустановки на базе преобразователя энергии Стирлинга (рис. 1.3).



Рисунок 1.3. Внешний вид преобразователя энергии Стирлинга

В одной из многочисленных статей Кириллова Н.Г. [63], посвященных использованию энергоустановок на базе двигателей Стирлинга, описывается разработка комбинированной теплосиловой энергоустановки. Данное изобретение относится к области преобразователей энергии прямого цикла, предназначенное для энергоснабжения стационарных и передвижных объектов при одновременном производстве электрической и тепловой энергий. В энергоустановке достигается повышение КПД и снижение массогабаритных характеристик за счет усовершенствования конструкции и применения новых технических решений.

При всех приведённых выше положительных аспектах работы типичных источников автономного энергоснабжения [79, 80], на данный момент сложно оценить степень надёжности их функционирования в условиях Сибири и Дальнего Востока РФ. Так, например, энергоустановки на базе двигателя Стирлинга [80] имеются на балансе предприятий, осуществляющих энергоснабжение удалённых объектов, в единичных экземплярах и эксплуатируются в течение относительно небольшого периода времени, что не позволяет сделать комплексный анализ работы энергоустановок [10].

Наиболее распространены энергоустановки, осуществляющие автономное энергоснабжение удалённых объектов, – мини-ТЭС, работающие по органическому циклу Ренкина [81]. Особенностью этого замкнутого термодинамического цикла является использование в качестве рабочего тела органического вещества (как с более низкой, так и более высокой относительно воды температурой кипения) [81]. Типичным примером энергоустановки, функционирующей по такому принципу, служит установка компании «Ormat» (рис. 1.4).



Рисунок 1.4. Внешний вид мини–ТЭС компании «Ormat»

Типичная мини–ТЭС компании «Ormat» имеет только одну вращающуюся часть [81]. Колесо турбины и генератор переменного тока смонтированы на общем валу, который вращается на двух комбинированных скользящих подшипниках, смазываемых органической рабочей жидкостью. Недостатком такой установки является относительно низкий КПД выработки электроэнергии. К достоинствами необходимо отнести низкую чувствительность к изменению состава топлива и высокий ресурс до капитального ремонта [81].характеризуются низкой чувствительностью к изменению состава топлива

Кроме того, мини–ТЭС с замкнутым циклом компании «Ormat» мощностью 1500 Вт уже более 15 лет используются для энергоснабжения удалённых линейных объектов единой газотранспортной системы России. На данный момент на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока РФ функционируют более 100 таких мини–ТЭС [10].

Но несмотря на достаточно большое количество эксплуатируемых в России мини–ТЭС с замкнутым циклом, комплексных исследований, позволяющих оценить фактические характеристики работы энергоустановок в зависимости от различных факторов и изменения технологического процесса, до настоящего времени не проводилось.

К таким исследованиям можно отнести анализ изменения параметров работы мини–ТЭС в когенерационном режиме в зависимости от температуры наружного воздуха; изменение электрического и термического КПД в зависимости от электрической и тепловой нагрузок; интегральные характеристики процессов тепло – и массопереноса при конденсации рабочей жидкости в зависимости от электрической нагрузки, климатических условий эксплуатации энергоустановок и других факторов; изменение параметров работы энергоустановки в зависимости от качества природного газа.

Отсутствие результатов соответствующих экспериментальных исследований связано с невозможностью отключения мини–ТЭС от удаленных объектов в необходимое для проведения анализа время. Приобретение отдельных агрегатов или мини–ТЭС в целом для исследовательских целей нецелесообразно в связи с необходимостью создания реальных условий работы, а также значительной стоимостью. Изучение интегральных характеристик мини–ТЭС в межремонтный период осложнено необходимостью приобретения дорогостоящего оборудования для выполнения экспериментов (использование только установленных стационарных датчиков на энергоустановках недостаточно). Такие исследования представляются возможными лишь с использованием новых подходов и методов численного моделирования процессов, протекающих в основных узлах и агрегатах рассматриваемых мини–ТЭС.

Помимо отсутствия результатов экспериментальных исследований работы мини–ТЭС, эксплуатирующие их предприятия часто сталкиваются с проблемами надежности и ресурсоэффективности таких станций. В настоящее время опубликовано достаточное количество научных работ,

описывающих расчет основных показателей надежности различного оборудования, агрегатов и мини-ТЭС в целом, например, [82–89]. Однако опубликованных нормативных значений показателей надежности для данного типа оборудования и установок практически нет. В связи с этим целесообразно выполнить анализ интегральных характеристик надежности работы автономных источников энергоснабжения, эксплуатируемых на объектах Единой системы газоснабжения России, определить причины наиболее частых отказов и последующего выхода из строя автономных источников энергоснабжения, сформулировать рекомендации по повышению интегральных показателей надежности автономных источников энергоснабжения.

Выводы по первой главе

1. Обзор современных решений в области автономного энергоснабжения показал, что в России большая часть удаленных технологических объектов снабжается электрической энергией и теплом при использовании типичных мини-ТЭС, работающих в режиме когенерации.
2. Несмотря на достаточно большое количество опубликованных работ, посвященных использованию автономных энергоустановок, в настоящее время полученные результаты не позволяют сделать обобщенный прогноз ресурсоэффективности и надежности применения тех или иных автономных источников энергоснабжения (в первую очередь, мини-ТЭС) в различных условиях эксплуатации на удаленных объектах. Малый объем статистической информации по наработке и техническим происшествиям при эксплуатации энергоустановок не позволяет проанализировать и выявить первопричины технических сбоев. Эти проблемы особенно важны для предприятий, эксплуатирующих большое количество удаленных технологических объектов с соответствующими

мини–ТЭС, в частности, на магистральных газо – и нефтепроводах России.

3. Целесообразно проведение анализа надежности и ресурсоэффективности мини–ТЭС, работающих на удаленных объектах, и статистического анализа отказов таких энергоустановок с целью определения первопричин технических происшествий.
4. Экспериментальные исследования интегральных характеристик работы типичных автономных источников энергоснабжения затруднены вследствие больших материальных затрат, связанных с их вынужденным простоем (при проведении опытов и монтаже дополнительных контрольно-измерительных приборов) и необходимостью привлечения высокоточного диагностического оборудования. Используемые широко в настоящее время методы подбора параметров также характеризуются большими материальными затратами. Поэтому математическое моделирование технологических процессов, протекающих в рассматриваемых автономных источниках энергоснабжения, является перспективным инструментом определения условий их ресурсоэффективной эксплуатации (по надежности, привлекаемым временным и материальным ресурсам, износу оборудования и другим параметрам).
5. По результатам выполнения таких исследований могут быть разработаны рекомендации для снижения числа технических происшествий, а также созданы прогностические модели, позволяющие определять масштабы влияния группы основных внешних и внутренних факторов на работу агрегатов и узлов мини–ТЭС.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ И РАБОЧЕГО РЕСУРСА МИНИ–ТЭС УДАЛЕННЫХ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ РОССИИ

Для определения причин возникновения наиболее типичных аварийных технических происшествий при эксплуатации источников энергоснабжения удаленных линейных объектов единой газотранспортной системы России собрана, обработана и проанализирована статистическая информация о работе 101 мини–ТЭС, обслуживающих магистральные газопроводы «Камчатка» и «Сахалин–2» на территории Дальнего Востока РФ (регион особенно интересен вследствие сложных климатических условий и достаточно большой удаленности линейных объектов газопроводов от централизованного энергоснабжения).

2.1. Описание принципа действия мини–ТЭС

Цикл работы типичной мини–ТЭС (рис. 2.1.1) газотранспортной системы России предполагает следующие этапы [81]. Главная горелка 3 нагревает органическую рабочую жидкость в парогенераторе 6. Часть жидкости испаряется и пар, расширяясь, приводит во вращение колесо турбины 8 и соединенный с ним ротор генератора 9. Затем пар поступает в конденсатор 12, где охлаждается и конденсируется. Полученная жидкость возвращается насосом 10 в парогенератор, охлаждая электрогенератор и смазывая подшипники. Цикл повторяется непрерывно до тех пор, пока происходит нагрев рабочей жидкости в парогенераторе.

Корпус из нержавеющей стали (рис. 2.1.1) для пара и жидкости герметичен. Потерь рабочей жидкости не происходит.

Турбогенератором вырабатывается трехфазный переменный ток, который затем выпрямляется и фильтруется. Выход постоянного тока

регулируется в зависимости от нагрузки энергоустановки за счет автоматического изменения количества топлива, подаваемого на систему зажигания [81].

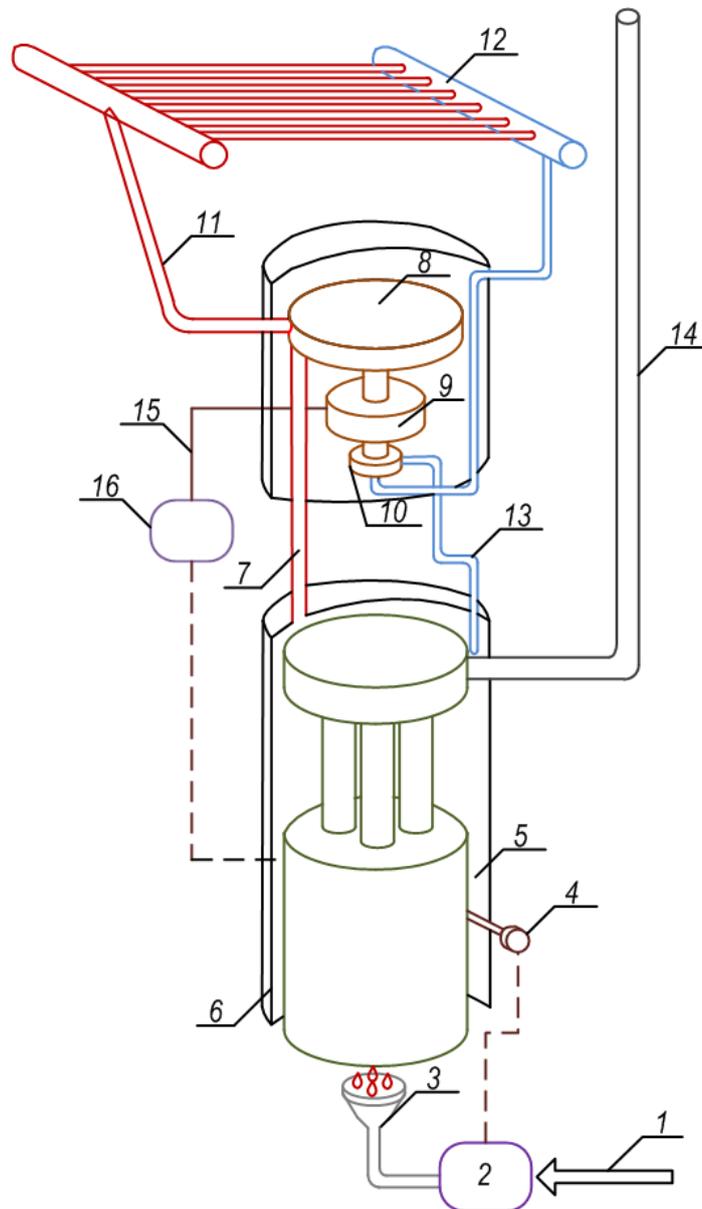


Рисунок 2.1.1. Схема мини-ТЭС, работающей по замкнутому циклу пара:

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

В связи с тем, что мини-ТЭС располагаются в непосредственной близости от магистральных газопроводов, основным топливом является природный газ [81].

Газоснабжение мини-ТЭС осуществляется через редуцирующий пункт (являющийся частью энергоустановки, но расположенный в отдельном помещении), основным назначением которого является снижение давления газа с 100 бар (давление может меняться в зависимости от удаленности источника) до выходного значения 1 бар. Подача газа производится двумя потоками через два отдельных 50-микронных фильтра твердых частиц, объединяющихся в общий поток, поступающий в электрический нагреватель (рис. 2.1.1). В электрическом нагревателе происходит подогрев газа до температуры выше 0°C (в силу эффекта Джоуля-Томпсона при таком уменьшении давления температура газа понижается на 40°C). Выходная температура поддерживается равной 2°C, чтобы в случае наличия в газе конденсата не образовывался лед. На выходе из электрического нагревателя поток газа снова разделяется на две части, и каждая проходит через свой редуциционный клапан. Далее газ подается в систему зажигания, состоящую из главной и запальной горелок, защитного выключателя, системы ручного и повторного зажигания. Главная горелка выполняет функции источника теплоты для парогенератора. Ее работой (в зависимости от нагрузки на энергоустановку) управляет автоматическая система. Запальная горелка используется для многократного воспламенения главной. Защитный выключатель управляет электромагнитным клапаном подачи газа и приводит в действие термопару, измеряющую температуру пламени запальной горелки (защитный выключатель обеспечивает поток газа к запальной и главной горелкам только при наличии пламени на запальной). Ручная система зажигания вырабатывает электрический разряд для воспламенения запальной горелки (при пуске энергоустановки).

Система автоматического повторного зажигания приводится в действие датчиком ионизации, вырабатывает электрический разряд для повторного

воспламенения запальной горелки, если во время работы горение по какой-либо причине прекратилось.

Управление работой всех систем мини-ТЭС в соответствии с запрограммированными алгоритмами выполнения логических операций обеспечивает цифровой блок управления (рис. 2.1.1).

2.2. Статистика технических происшествий

Несмотря на многоуровневые защиты [90], при эксплуатации рассматриваемых мини-ТЭС ежегодно фиксируются десятки технических происшествий, приводящих к их нерегламентированным остановам (полная статистика происшествий приведена в Приложении).

Результаты анализа технических происшествий в работе мини-ТЭС, действующих по замкнутому циклу пара, представлены автором диссертации ниже в таблице 2.2.1 [91–93].

Таблица 2.2.1

Статистика типичных технических происшествий
на мини-ТЭС (мощность 4 кВт) магистральных газопроводов
«Камчатка» и «Сахалин-2» в период с 2008 по 2012 год

№ п/п	Год ввода в эксплуатацию	Время наработки, ч	Причины технических происшествий при работе энергоустановок							
			Обрыв пламени горелочного устройства	Механическая неисправность турбоагрегата	Нестабильное напряжение на аккумуляторных батареях	Некорректная работа КИПиА	Предельно высокая температура в конденсаторе	Останов вследствие неустойчивой работы турбоагрегата	Неисправность системы пожаротушения	Другие технические происшествия
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2011	2800	14.10.11 16.10.11 17.10.11			23.01.12				
2	2011	7100	19.10.11 22.11.11 26.11.11 03.12.11 06.12.11	23.06.12						
3	2011	8200	17.10.11 19.10.11 16.11.11 22.11.11 28.11.11 06.12.11							

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	2011	6732	17.11.11 06.12.11	26.08.12	09.10.11 19.10.11					
5	2008	24480				02.03.11		14.05.11	27.02.11	04.02.12
6	2008	32232	04.06.11			26.03.11 19.02.11 28.01.11				29.05.11
7	2008	28896	20.11.11	19.12.11						05.01.12
8	2011	15072					03.07.12			06.07.12
9	2008	30408		22.02.12			08.07.11			
10	2010	17376					12.07.11 11.06.11 19.06.11 27.03.11 30.03.11 15.03.11 27.03.11 14.02.11 10.01.11 21.01.11 30.01.11			
11	2008	22488		22.03.11			12.08.11			02.01.11
12	2008	27072		15.01.10 06.10.10 03.10.11			05.08.11 03.07.11 11.06.11 19.06.11 26.06.11			

Анализ информации, представленной в табл. 2.2.1, позволил установить, 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 (рис. 2.2.1).

Выделенные основные (суммарно 66 %) аварийные технические происшествия (рис. 2.2.1) можно разделить на две группы. К первой относятся обрыв пламени горелочного устройства и предельно высокая температура в конденсаторе – технические происшествия, последствия которых устраняются в процессе эксплуатации.

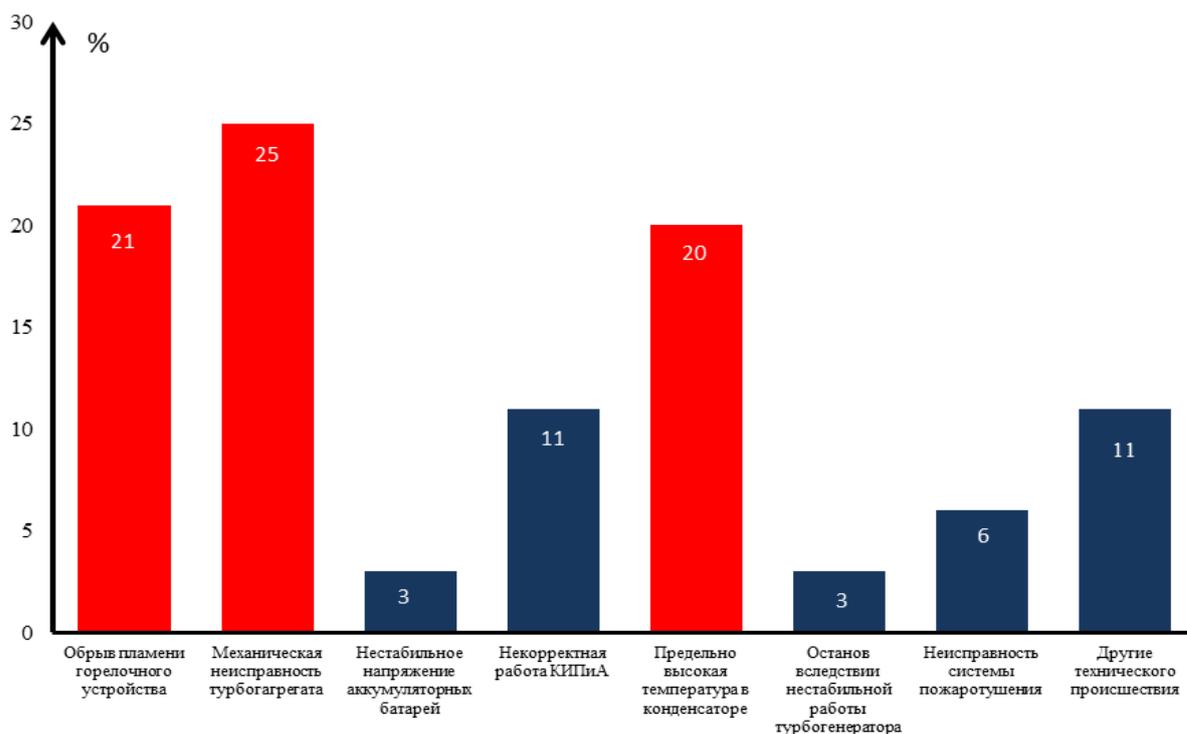


Рисунок 2.2.1. Статистика наиболее типичных аварийных технических происшествий

В 80 % случаев обрыв пламени горелочного устройства (рис. 2.2.2) 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.

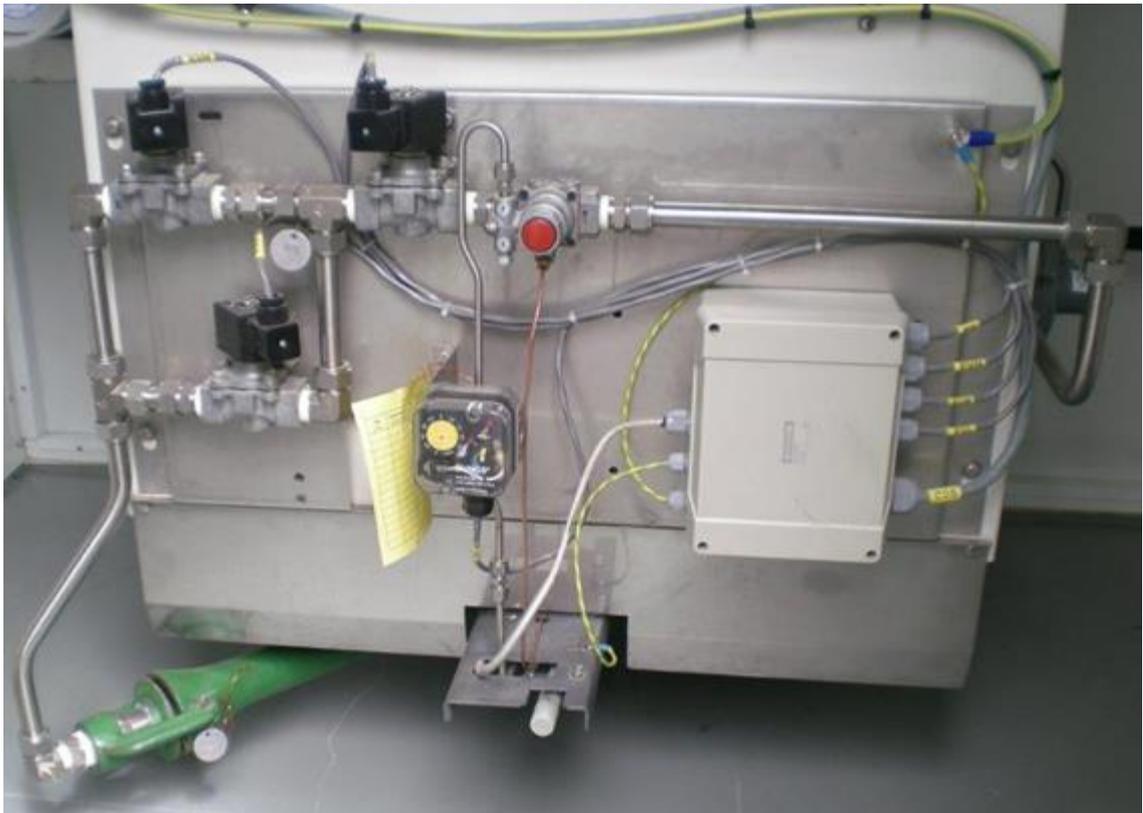


Рисунок 2.2.2. Внешний вид горелочного устройства мини-ТЭС

Предельно высокая температура рабочего тела в конденсаторе (рис. 2.2.3) приводит к отклонению характеристик его работы от номинальных. При этом энергоустановка (мини-ТЭС) может функционировать некоторое время в таких условиях (объект не остается полностью без энергообеспечения). Однако, как показывает отчетная документация [20–22], времени, при котором энергоустановка будет работать в таком режиме, не всегда достаточно на выезд аварийной группы специалистов для устранения выявленной неисправности.

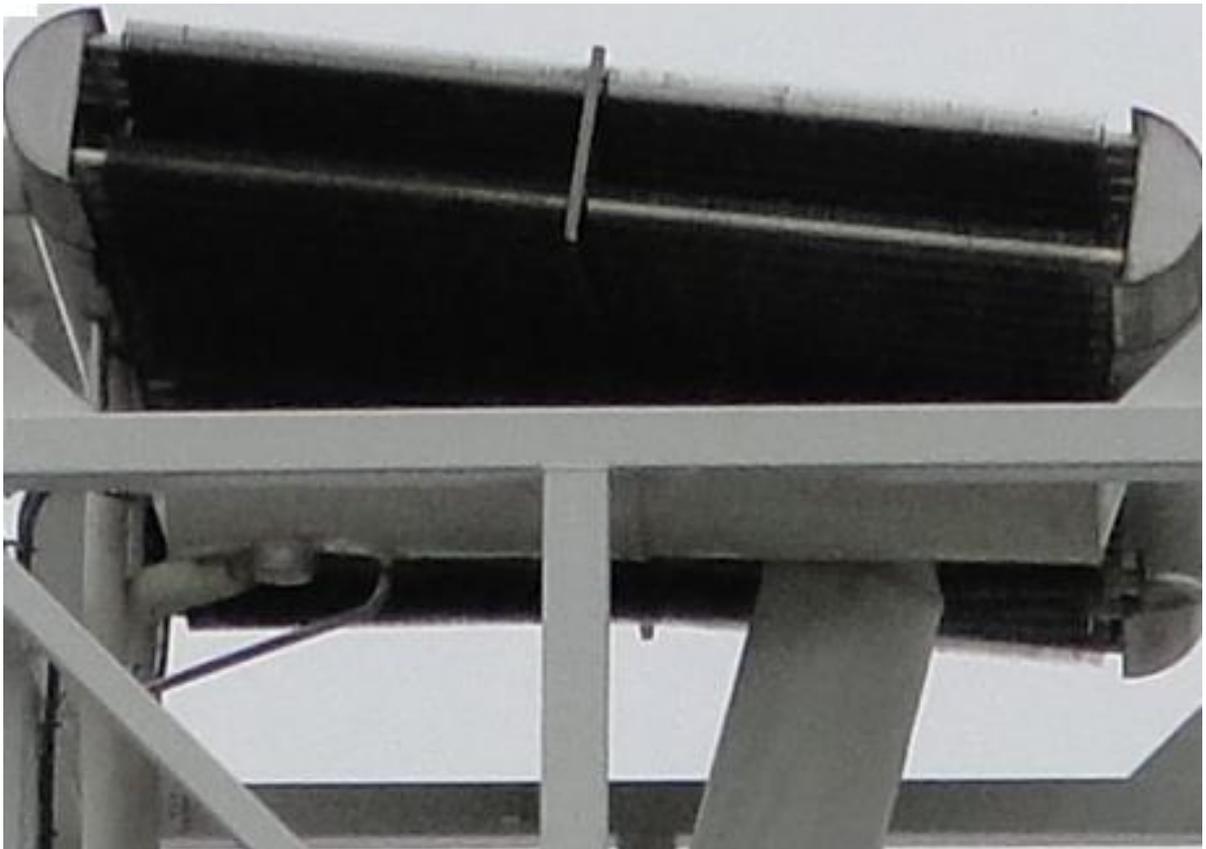


Рисунок 2.2.3. Внешний вид конденсатора мини-ТЭС

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 (рис. 2.2.4).

Важно отметить, что турбоагрегат со всех сторон закрыт металлическими панелями (рис. 2.2.4). Это существенно затрудняет его изучение. Лишь при выходе из строя и переводе агрегата на ремонт металлические панели снимаются и проводятся соответствующие работы.



Рисунок 2.2.4. Внешний вид турбоагрегата мини-ТЭС

В результате этого технического происшествия энергообеспечение объекта невозможно. Появление выделенной причины, как правило, связано с неисправностью подшипников скольжения турбоагрегата (по заключению экспертов завода-изготовителя мини-ТЭС [81, 90]).

2.3. Вычисление показателей надежности и рабочего ресурса

Для первой группы выше перечисленных технических происшествий (рис 2.2.1) основным показателем надежности является параметр потока отказов $\omega(t)$ [18], а для второй – интенсивность отказов $\lambda(t)$ [18]. Далее приведены результаты расчета этих параметров относительно таких аварийных технических происшествий, как обрыв пламени горелочного устройства и механическая неисправность турбоагрегата (рис. 2.2.1).

Значения параметра потока отказов $\omega(t)$ по причине обрыва пламени горелочного устройства вычислялись по формуле [5]:

$$\omega(t) = \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{N_0 \cdot \Delta t} = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t} = \frac{\Omega(t+\Delta t) - \Omega(t)}{\Delta t}, \quad (2.1.1)$$

где $n(t+\Delta t)$, $n(t)$ – количество отказов, возникших до моментов $t+\Delta t$ и t соответственно; N_0 – общее количество объектов под наблюдением; $n(\Delta t)$ – количество отказов за промежуток времени Δt ; $\Omega(t)$ – функция потока отказов.

Для отказов, произошедших в результате обрыва пламени горелочного устройства (ОПГУ) энергоустановки до первого технического обслуживания ТО–1 (наработка до 8000 час), параметр $\omega(t)$ составил:

$$\omega_{\text{ТО-1 ОПГУ}} = \frac{16}{101 \cdot 8000} = 1,98 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч.}$$

Для отказов, произошедших в результате обрыва пламени горелочного устройства энергоустановки до второго технического обслуживания ТО–2 (наработка до 16000 час) параметр $\omega(t)$ равен:

$$\omega_{\text{ТО-2 ОПГУ}} = \frac{28}{101 \cdot 16000} = 1,73 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч.}$$

Расчет показателя потока отказов, произошедших в результате обрыва пламени горелочного устройства в период эксплуатации с 2008 по 2012 годы, позволил установить:

$$\omega_{2008-2012} = \frac{34}{101 \cdot (5 \cdot 365 \cdot 24)} = 0,77 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч.}$$

Полученные значения $\omega(t)$ для рассматриваемых автономных энергоустановок – мини-ТЭС (рис. 2.1.1) соответствуют реально возможным диапазонам, исходя из анализа [6, 7].

Основным показателем надежности турбоагрегата (относительно механической неисправности) является интенсивность отказов $\lambda(t)$ [18]. Для вычисления интенсивности отказов $\lambda(t)$ использовалось следующее выражение [18]:

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N_{\text{cp}} \Delta t} = \frac{n(t)}{[N - n(t) \Delta t]} = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (2.1.2)$$

где N_{cp} – среднее число исправно работающих образцов в некотором расчетном интервале времени $\left(N_{\text{cp}} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2} \right)$; N_i – число исправно работающих образцов в начале выбранного интервала Δt ; N_{i+1} – число исправно работающих образцов в конце интервала Δt ; Δt – интервал времени; N – общее число рассматриваемых изделий; $f(t)$ – частота отказов узлов (деталей); $P(t)$ – вероятность безотказной работы; $n(t)$ – число отказавших образцов в интервале времени от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$.

Значение показателя интенсивности отказов в результате механической неисправности турбоагрегата (МНТ) до первого технического обслуживания ТО-1 (наработка до 8000 час), составляет:

$$\lambda_{\text{ТО-1 МНТ}} = \frac{16}{(101 - 16) \cdot 8000} = 2,35 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч.}$$

Для интервала времени, соответствующего второму техническому обслуживанию ТО–2 (наработка до 16000 час), параметр $\lambda(t)$ равен:

$$\lambda_{\text{ТО-2 МНТ}} = \frac{22}{(101 - 22) \cdot 16000} = 1,74 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч.}$$

Значение показателя интенсивности отказов в результате механической неисправности турбоагрегата в период эксплуатации с 2008 по 2012 годы, составляет:

$$\lambda_{2008-2012} = \frac{54}{(101 - 54) \cdot (5 \cdot 365 \cdot 24)} = 2,62 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч.}$$

Выполнено сопоставление установленных значений $\lambda(t)$ с аналогичными параметрами энергоблоков с паротурбинными установками различной мощности [88], а также транзисторами, как наиболее типичными электронными компонентами [94].

Установлено, что рассчитанные для рассматриваемых мини–ТЭС значения $\lambda(t)$ существенно превышают $\lambda(t)$ для типичных транзисторов ($\lambda(t)=5 \cdot 10^{-7}$ 1/час) [94] и несколько меньше $\lambda(t)$ для паротурбинных установок ($\lambda(t)=6,5 \cdot 10^{-4}$ 1/час) [88]. Это хорошо соответствует основным положениям современной теории надежности [89] и иллюстрирует высокие значения $\lambda(t)$ для рассматриваемых мини–ТЭС, учитывающих особенности конструкции, составных элементов и принципа действия (рис. 2.1.1).

При отсутствии опубликованных нормативных данных о допустимых $\omega(t)$ и $\lambda(t)$ для рассматриваемых источников автономного энергоснабжения – мини–ТЭС можно рекомендовать использовать вычисленные значения $\omega(t)$ и $\lambda(t)$ 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.

Вполне очевидно, что возможно существенное уменьшение полученных значений $\omega(t)$ и $\lambda(t)$. Для этого целесообразно установить

возможные первопричины рассматриваемых технических происшествий и разработать соответствующие рекомендации по снижению их числа.

2.4. Анализ первопричин основных технических происшествий

Особый интерес представляет изучение первопричин трех основных аварийных технических происшествий на рассматриваемых мини–ТЭС (обрыв пламени горелочного устройства, механическая неисправность турбоагрегата и предельно высокая температура в конденсаторе) – на них приходится 66 % от числа всех происшествий (рис. 2.2.1).

2.4.1. Обрыв пламени горелочного устройства

В результате анализа возможных первопричин возникновения технического происшествия «обрыв пламени горелочного устройства» (с использованием материалов соответствующих экспертиз и отчетов после аварий [20–23, 81, 90]) были определены и систематизированы наиболее типичные из них (рис. 2.4.1.1) [91–93]:

1. Нерегламентированная работа редуцирующего пункта.
2. Выход из строя системы автоматического повторного зажигания.
3. Выход из строя термопар.

По причине «нерегламентированная работа редуцирующего пункта» зафиксировано 68,8 % аварийных технических происшествий, связанных с обрывом пламени горелочного устройства (рис. 2.4.1.1). Главным фактором, влияющим на работу редуцирующего пункта, является компонентный состав газа [90]. Особенно актуальной данная проблема является для энергоустановок, использующих в качестве топлива природный газ с температурой точки росы по воде выше среднего (например, энергоустановки, обслуживающие магистральные газопроводы полуострова Камчатка) [10]. Наличие в газообразном топливе капель воды приводит к

образованию «газовых гидратов» [95], т.е. к формированию неустойчивых соединений углеводородов с водой. Они представляют собой белые кристаллы, внешне похожие на снег или лед и состоящие из нескольких молекул воды и газа (метан, пропан, углекислый газ и другие).



Рисунок 2.4.1.1. Соотношение различных причин аварийного технического происшествия «обрыв пламени горелочного устройства»

Останов мини-ТЭС по причине нерегламентированной работы редуцирующего пункта (рис. 2.4.1.2) также может происходить при загрязнении фильтров крупно- и мелкодисперсными частицами, находящимися в природном газе. Наличие инородных тел в фильтре приводит к изменению давления на выходе из редуцирующего пункта. Как следствие, система зажигания мини-ТЭС работает с отклонениями от регламентированных режимов.

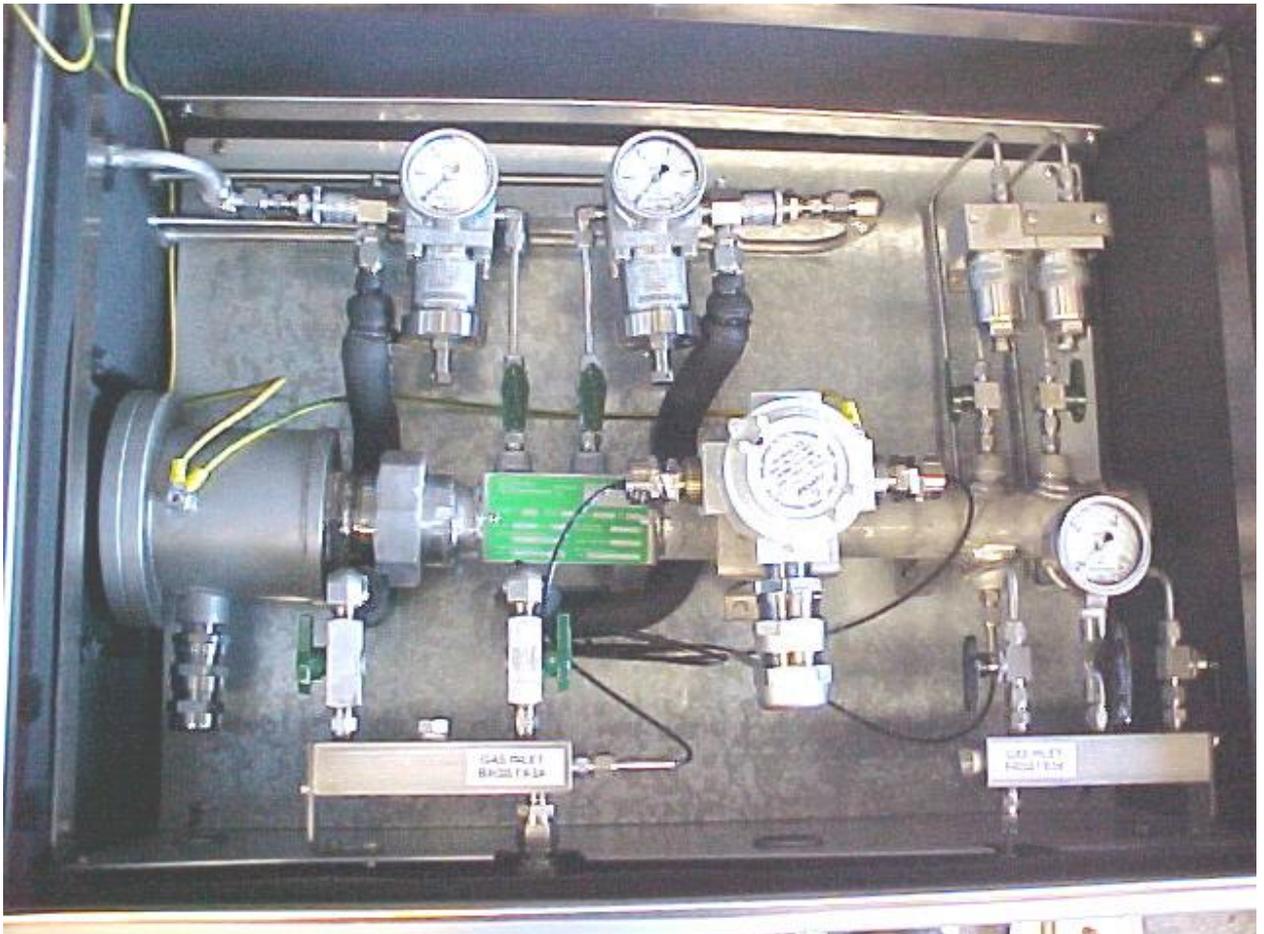


Рисунок 2.4.1.2. Внешний вид редуцирующего пункта мини–ТЭС

Исключить возникновение таких технических происшествий при использовании в редуцирующем пункте системы очистки, состоящей из двух 50-микронных фильтров, сложно, так как установленные фильтры могут засоряться влагосодержащими крупнодисперсными частицами и не уменьшают влагосодержание газа.

В связи с вышеизложенным целесообразно рассмотреть возможность использования более эффективной комплексной системы очистки поступающего в редуцирующий пункт природного газа:

1. Фильтр-осушитель – для удаления влаги из природного газа.
2. Фильтр грубой очистки – для удаления крупнодисперсных частиц.
3. Фильтр мелкой очистки – для удаления мелкодисперсных частиц.

Оценивая материальные затраты, связанные с простоем энергоустановок, их ремонтом и запуском в эксплуатацию, и стоимость

перечисленных дополнительных фильтров, а также учитывая довольно тревожную статистику (рис. 2.2.1, 2.4.1.1), можно сделать вывод о целесообразности установки рассмотренных фильтров.

В более чем 20 % случаев (рис. 2.4.1.1) причиной обрыва пламени горелочного устройства является выход из строя системы автоматического повторного зажигания, что также приводит к останову энергоустановки. Данная система вырабатывает разряд электрического тока для повторного воспламенения запальной горелки с помощью двух свечей зажигания (основной и резервной) при погасании пламени (рис. 2.4.1.3).



Рисунок 2.4.1.3. Внешний вид свечей системы автоматического повторного зажигания мини-ТЭС

Выход из строя свечей зажигания является основной причиной аварийных ситуаций в работе системы автоматического повторного зажигания [90]. Анализ отчетной документации по ремонтам [20–22] показывает, что выход из строя свечей зажигания в большинстве случаев происходит в результате пробоя изолятора или изменения конструктивных характеристик в процессе эксплуатации. Так как изолятор служит для

предохранения свечи зажигания от перегревов, это главным образом влияет на работу свечи. Изменение конструктивных характеристик влечет за собой изменение угла наклона свечи к запальной горелке (при нормативном расположении расстояние между искрящим электродом и запальной горелкой должно составлять 3÷4 мм) [90]. Возможные отклонения (до 1 мм) могут происходить вследствие заводского брака свечи зажигания, некачественного проведения пуско-наладочных работ или неправильного подбора свечей на заводе-изготовителе. Указанные факторы имеют особенно важное значение, так как пробой изолятора главным образом происходит из-за перегрева свечи. По этой же причине происходит и изменение конструктивных характеристик.

Выполненный анализ позволяет сделать вывод о целесообразности введения дополнительных операций проверки геометрических параметров свечей зажигания, их выбора по номинальным электрическим параметрам и оценки изменения конструктивных характеристик при плановых технических обслуживаниях. Для обязательного выполнения этих процедур можно рекомендовать внести соответствующие изменения (если таковы еще не внесены) в нормативные документы эксплуатирующих мини-ТЭС предприятий.

Третьей основной причиной технических происшествий (рис. 2.4.1.1), связанных с обрывом пламени горелочного устройства, является выход из строя термопар (рис. 2.4.1.4).



Рисунок 2.4.1.4. Внешний вид термопар запальной горелки мини-ТЭС

Установленные на запальной горелке термопары выполняют защитные функции, необходимые для прекращения подачи газа к запальной горелке в случае обрыва пламени путем подачи сигнала на клапан защиты от срыва пламени. В настоящее время наиболее часто используются термопары трех марок [81, 90]: хромель-алюмелевые, хромель-копелевые и вольфрам-рениевые. Хромель-алюмелевые термопары работают в диапазоне измеряемых температур от -50 до 1100°C при длительном применении и кратковременно могут измерять температуры до 1300°C . Из-за усиливающейся диффузии компонентов сплава при температурах выше 1100°C ресурс термопары сильно снижается. Термопара чувствительна к загрязнениям, нестабильно работает в атмосфере, содержащей соединения углерода.

Хромель-копелевые термопары применяют при продолжительном измерении температуры до 600°C и кратковременном до 800°C . Данный сплав термически устойчив к химическому воздействию воздуха до 600°C . Изменение термоЭДС, отнесенное к одному градусу, у этой термопары намного больше, чем у других термопар.

Вольфрам-рениевые же термопары рекомендуются для измерения температур до 2800°C. Термопары из вольфрам-рениевого сплава являются самыми высокотемпературными контактными датчиками температуры. Вольфрамовый сплав с 25% Re применяют в качестве отрицательного термоэлектрода. Положительным термоэлектродом служит сплав вольфрама с 3% Re. Термопары W, Re3 – W, Re25 устойчивы в нейтральной и слабо восстановительной атмосфере. В окислительной атмосфере, в присутствии углеводородных газов, термопара разрушается из-за образования оксидов или карбидов вольфрама. Так как условия эксплуатации термопар в корпусах энергоустановок трудно проконтролировать и выполнить анализ их отклонений относительно номинальных, то можно предположить, что останов энергоустановок по причине частых отказов термопар связан с использованием средств измерений, условия работы (высокие и низкие температуры, повышенная влажность, перенапряжения и т.д.) которых не изучены в полной мере.

Поскольку проконтролировать условия эксплуатации термопар в закрытых энергоустановках не представляется возможным, то целесообразно рекомендовать проведение дополнительного входного контроля по калибровке и поверке в момент проведения пуско-наладочных работ на энергоустановках, а также проведение их дополнительного технического обслуживания (с целью некоторой адаптации к условиям эксплуатации).

2.4.2. Механическая неисправность турбоагрегата

Механическая неисправность турбоагрегата – причина, по которой происходит до 25% всех аварийных остановов (рис. 2.2.1) эксплуатируемых на магистральных газопроводах мини-ТЭС. В результате данного технического происшествия мини-ТЭС выходит из строя и энергообеспечение объекта ставится под угрозой. Эта причина во всех случаях связана с неисправностью подшипников скольжения (рис. 2.4.2.1)

турбоагрегата (по заключению экспертов завода-изготовителя энергоустановок [81, 90]).



Рисунок 2.4.2.1. Внешний вид типичного подшипника скольжения турбоагрегата мини-ТЭС

Из отчетной документации по ремонтам подшипников скольжения турбоагрегата мини-ТЭС [20–22] можно сделать вывод о том, что их выход из строя главным образом связан с не регламентной работой системы смазки. В рассматриваемых мини-ТЭС подшипники смазываются органическим теплоносителем, поступающим после охлаждения до требуемой температуры из конденсатора [90]. Как следствие, параметры смазывающей подшипники турбоагрегата жидкости главным образом зависят от исправности конденсатора мини-ТЭС. В этом агрегате, в свою очередь, достаточно часто реализуется другое техническое происшествие – «предельно высокая температура в конденсаторе» (рис. 2.2.1). 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.

2.4.3. Предельно высокая температура в конденсаторе

Проанализировать влияние различных внешних и внутренних факторов на режимы работы таких агрегатов мини–ТЭС (рис. 2.1.1), как турбогенератор и горелочное устройство, достаточно сложно. Мини–ТЭС, как правило, поставляются в закрытом корпусе [2–4, 79–81]. Контрольно-измерительных приборов на агрегатах энергоисточника установлено минимальное количество (как следствие, затруднено описание стадий и режимов протекания соответствующих технологических процессов). Техническое обслуживание основных агрегатов мини–ТЭС осуществляют представители завода-изготовителя, поэтому изменение конструкции такой энергоустановки работниками эксплуатирующей организации практически невозможно.

В связи с этим единственным агрегатом рассматриваемых мини–ТЭС, функционирование которого можно исследовать на фундаментальном уровне, является воздушный конденсатор 12 (рис. 2.1.1). Он вынесен за пределы корпуса энергоисточника и цифровой блок мини–ТЭС регистрирует значения параметров конденсации в нескольких контрольных точках рабочих каналов.

Представляется целесообразным теоретически исследовать масштабы 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 единой газотранспортной системы России.

В третьей главе рукописи приведен разработанный математический аппарат для численного анализа закономерностей функционирования конденсаторной установки рассматриваемых мини–ТЭС. Результаты цикла теоретических исследований представлены в четвертой главе диссертации.

Выводы по второй главе

1. Впервые собрана, обработана и систематизирована информация по основным техническим происшествиям на типичных мини–ТЭС объектов Единой системы газоснабжения России.

2. Проанализированы первопричины возникновения основных аварийных технических происшествий (обрыв пламени горелочного устройства, механическая неисправность турбоагрегата и предельно высокая температура в конденсаторе) – на них приходится 66 % от всех происшествий.

3. Проведён расчёт показателей надёжности и рабочего ресурса рассматриваемых мини–ТЭС относительно наиболее типичных причин выхода из строя оборудования. Вследствие отсутствия нормативных значений этих параметров установленные значения можно рекомендовать к использованию в качестве номинальных.

4. Сформулированы рекомендации по внедрению мероприятий для снижения вероятности возникновения типичных аварийных технических происшествий при эксплуатации мини–ТЭС, работающих по замкнутому циклу пара.

5. Установлены технические происшествия, исследование которых наиболее важно с точки зрения последствий и возможно при минимальных затратах эксплуатирующей организации. В частности, показано, что наиболее целесообразно изучить технологические процессы в конденсаторных установках мини–ТЭС и определить причины выхода их из строя (особенно при экстремальных условиях эксплуатации – летний и зимний периоды).

ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО РАБОЧЕГО ТЕЛА В КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ МИНИ–ТЭС

Из условной схемы работы мини–ТЭС, приведенной на рис. 2.1.1, и анализа эксплуатационной документации завода–изготовителя [79–81, 90] можно сделать вывод о том, что используемая конденсаторная установка имеет достаточно сложную структуру и конструкцию. При этом вне зависимости от мощности мини–ТЭС для большей части линейных объектов единой газотранспортной системы России используются идентичные конденсаторные агрегаты [78–81]. Это позволяет выполнить численные исследования в рамках некоторой общей схемы и сформулировать соответственно достаточно универсальные рекомендации.

Основная причина выхода из строя конденсаторных установок мини–ТЭС – «предельно высокая температура рабочего тела в конденсаторе» (наименование ошибки в информационном блоке мини–ТЭС [81, 90]). Предварительный анализ данного технического происшествия показывает, что повышение температуры рабочего тела в конденсаторе возможно вследствие влияния большой группы как внешних (например, условия теплообмена), так и внутренних (например, теплофизические свойства рабочего тела, его температура, давление и скорость движения) факторов. Возможно при экстремальных условиях работы (в зимнее и летнее время) процесс конденсации не успевает завершиться полностью. Как следствие, температура рабочего тела нередко превышает номинальные значения. Дополнительные трудности вызывает применение нетрадиционных органических теплоносителей (в связи с необходимостью их использования при смазке подшипников скольжения турбоагрегатов).

Для анализа закономерностей конденсации рабочего тела в рассматриваемых условиях целесообразно сформулировать физические и

математические модели тепломассопереноса с учетом фазовых переходов, разработать соответствующие алгоритмы численного моделирования и провести цикл теоретических исследований возможных режимов конденсации в рассматриваемых мини–ТЭС с учетом реальных нагрузок, условий теплообмена, рабочих тел, конструкции и других факторов.

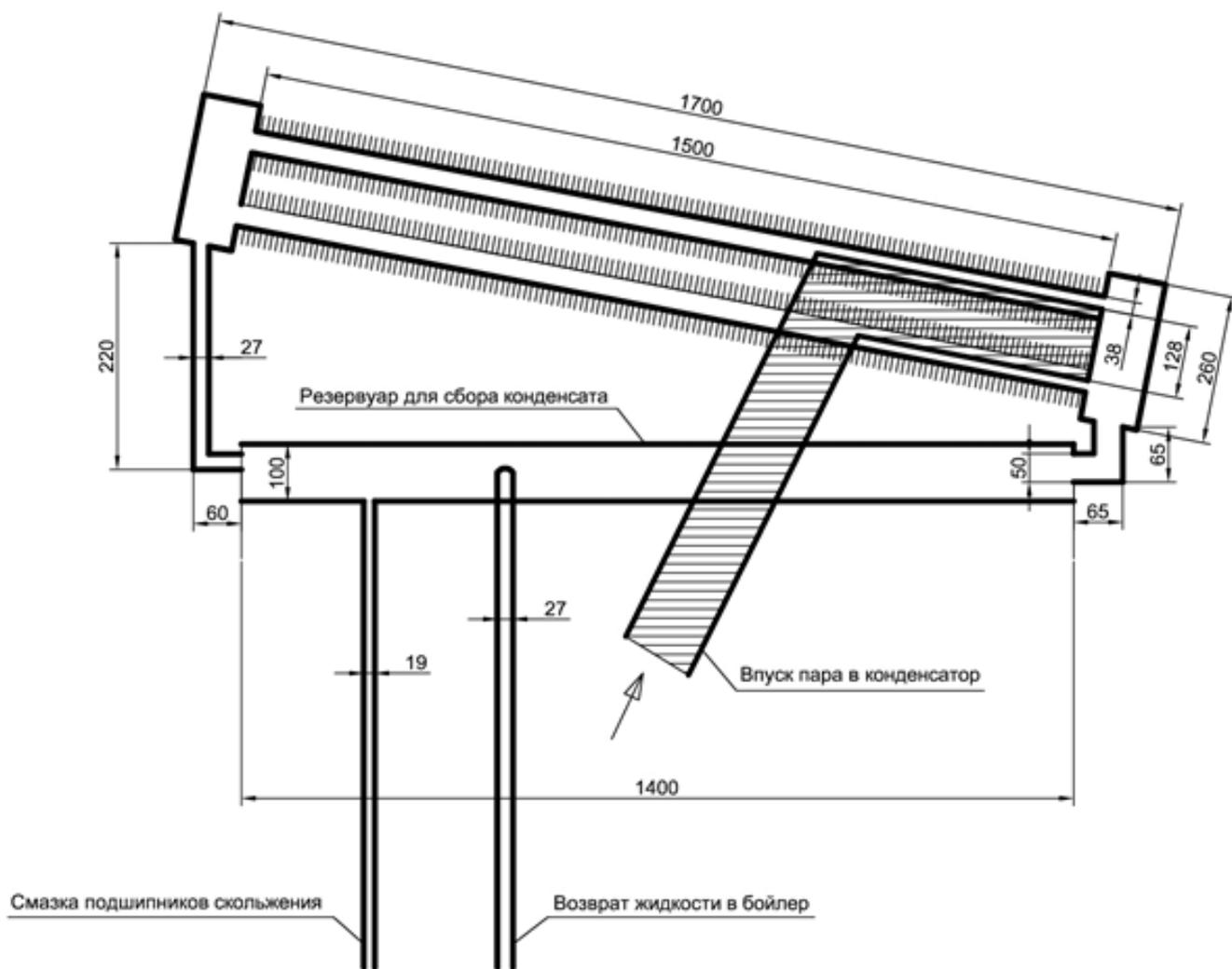
В настоящей главе приведены физическая и математическая модели процессов тепломассопереноса при конденсации органических теплоносителей в рассматриваемых мини–ТЭС (в соответствии с принципом действия и режимами работы конденсаторной установки), методы и алгоритм численного решения, а также описаны процедуры верификации результатов. В следующей главе представлены результаты цикла выполненных численных исследований влияния на интегральные характеристики процесса конденсации группы основных внешних и внутренних факторов.

3.1. Описание принципа действия и режимов работы конденсаторной установки мини–ТЭС, работающей по замкнутому циклу пара

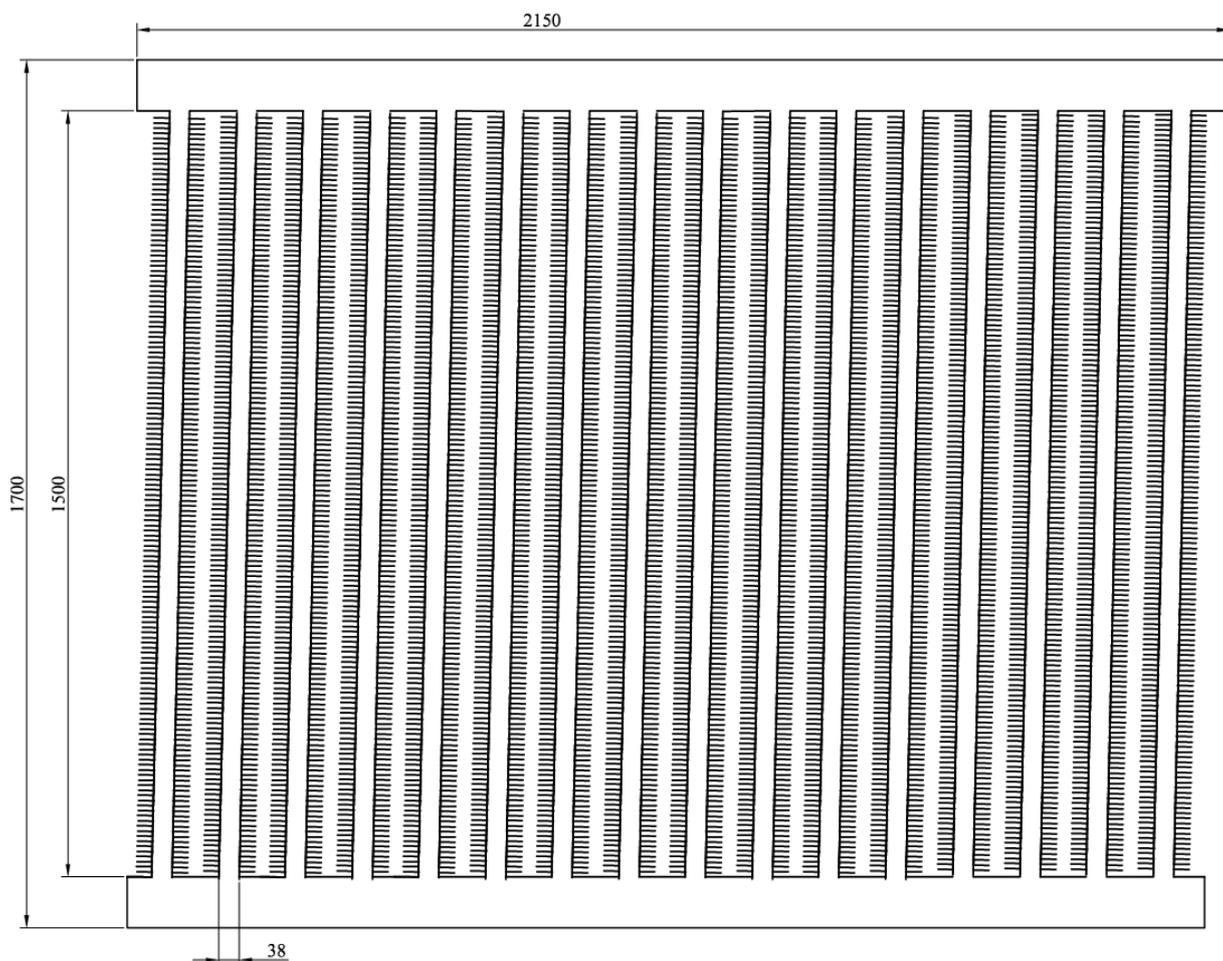
Конструкция конденсаторной установки типичного автономного источника энергоснабжения, работающего по замкнутому циклу пара, на удаленных линейных объектах газотранспортной системы России (мини–ТЭС) представлена на рис. 3.1.1.

Воздушный конденсатор состоит из расположенных друг над другом двух рядов 16 оребренных трубок с рабочим каналом внутренним диаметром $D_{in}=38$ мм. Трубки размещены под уклоном для стекания конденсата под действием силы тяжести и объединены двумя коллекторами. Конденсат из коллекторов поступает в общий резервуар (рис. 3.1.1). Далее небольшая часть органической жидкости направляется для смазки подшипников скольжения вала турбогенератора, остальная часть рабочей жидкости стекает в бойлер и возвращается в цикл.

Поскольку давление рабочего потока в конденсаторе ниже атмосферного, то при наличии дефектов изготовления и монтажа могут происходить подсосы воздуха во внутреннее пространство каналов конденсатора. В табл. 3.1.1 представлены сведения о режимах работы конденсатора в нормальном режиме и в условиях необходимости проведения дегазации при различных температурах наружного воздуха T_{out} и электрической нагрузке P согласно данным завода-изготовителя [90].



a



б

Рисунок 3.1.1. Схематичное изображение типичного конденсатора
мини-ТЭС: *a* – фронтальный вид; *б* – вид сверху

При температуре наружного воздуха выше $T_{out} \geq 273\text{K}$ условия теплоотвода от конденсатора даже при номинальном режиме эксплуатации ухудшаются (табл. 3.1.1), что подтверждает целесообразность проведения исследований режимов работы конденсаторной установки и разработки по результатам проведённых исследований рекомендаций для обеспечения удовлетворительных условий конденсации при различных значениях внешних и внутренних параметров.

Таблица 3.1.1

Режимы работы конденсатора мини-ТЭС,
работающей по замкнутому циклу пара [90]

T_{out}, K	$P, Вт$	T_{input}, K	Нормальный режим		Режим, требующий дегазации	
			T_{output}, K	Частота вращения вентилятора, об/мин.	T_{output}, K	Частота вращения вентилятора, об/мин.
253	1000	403±3	308±5	выкл.	318±5	выкл.
	2000	424±3	313±5	выкл.	323±5	выкл.
	3000	435±3	318±5	выкл.	328±5	выкл.
	4000	447±3	323±5	выкл.	333±5	мин. – выкл.
263	1000	404±3	313±5	выкл.	328±5	выкл.
	2000	425±3	318±5	выкл.	333±5	выкл.
	3000	436±3	328±5	выкл.	338±5	мин. – выкл.
	4000	448±3	333±5	мин. – выкл.	343±5	мин. – выкл.
273	1000	405±3	318±5	выкл.	333±5	мин. – выкл.
	2000	426±3	323±5	выкл.	338±5	мин. – выкл.
	3000	437±3	333±5	мин. – выкл.	343±5	мин. – выкл.
	4000	449±3	338±5	мин. – выкл.	348±5	мин. – выкл.
283	1000	406±3	318±5	мин. – выкл.	338±5	600±100
	2000	428±3	328±5	мин. – выкл.	343±5	900±100
	3000	438±3	338±5	300±100	343±5	>400
	4000	450±3	343±5	650±100	348±5	>750
298	1000	407±3	328±5	200±100	343±5	>300
	2000	429±3	333±5	600±100	348±5	>500
	3000	439±3	343±5	900±100	348±5	>1000
	4000	451±3	343±5	1300±100	358±5	>1400
308	1000	408±3	338±5	300±100	343±5	>600
	2000	430±3	343±5	800±100	348±5	>900
	3000	440±3	348±5	1000±100	348±5	>1200
	4000	452±3	348±5	1400±100	358±5	1500

T_{input} , T_{output} – температура рабочего вещества на входе и выходе из конденсатора, К

3.2. Физическая постановка задачи

Для упрощения постановки задачи тепломассопереноса в первом приближении принято, что трубки конденсатора расположены горизонтально (без уклона) (рис. 3.2.1).

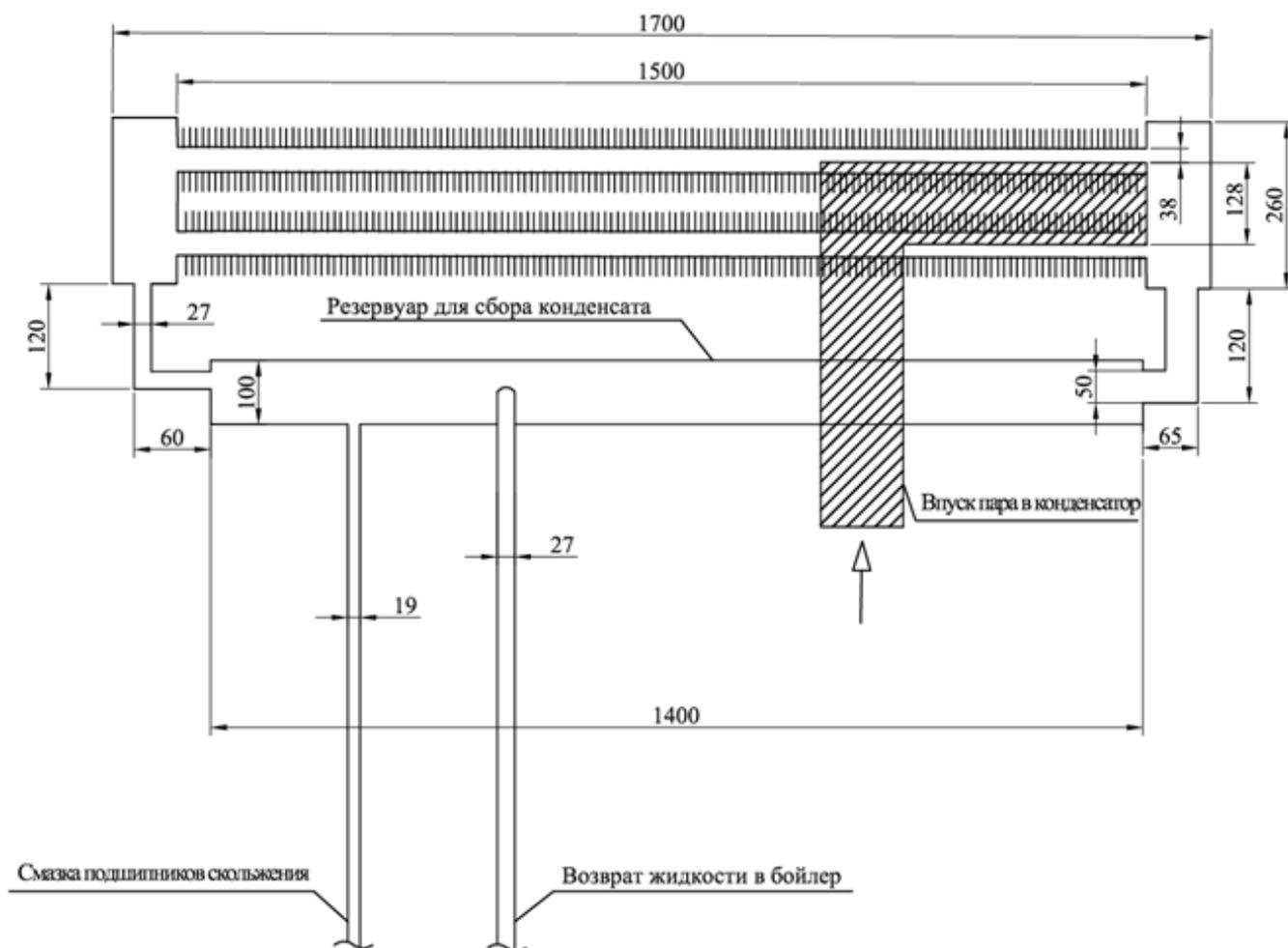


Рисунок 3.2.1. Упрощенная схема конденсаторной установки мини-ТЭС

Моделировался процесс конденсации в одиночной трубке, характерные размеры которой (длина и диаметр) идентичны размерам трубок конденсатора, объединённых коллекторами. Такая постановка задачи объясняется однотипностью конструкции типичных конденсаторных установок мини-ТЭС [81, 90].

Принята следующая схема процессов тепломассопереноса и фазовых переходов в рассматриваемой системе (рис. 3.2.2). Предполагалось, что рабочее тело (как правило, используется дихлорбензол [81, 90]) в парообразном состоянии при температуре T_{input} поступает в трубку конденсатора. За счёт теплоотвода через стенки трубки во внешнюю среду протекающие внутри каналов конденсатора пары дихлорбензола охлаждаются и реализуется фазовый переход – конденсация. На внутренней поверхности трубки образуется плёнка конденсата толщиной $\delta=y_2-y_1$.

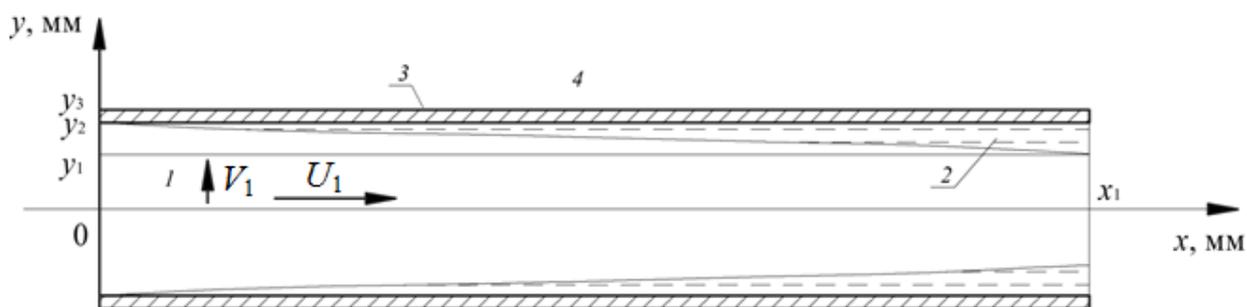


Рисунок 3.2.2. Схема области решения задачи:

- 1 – пары дихлорбензола; 2 – конденсат дихлорбензола;
- 3 – стенка трубки; 4 – окружающая среда (воздух)

При решении задачи тепломассопереноса использована декартова система координат, начало которой совпадает с осью симметрии трубки конденсатора (рис. 3.2.2). 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 [90];

2) пары дихлорбензола являются идеальным газом;

3) теплофизические характеристики взаимодействующих веществ не зависят от температуры. При рассматриваемых диапазонах изменения температуры в системе (рис. 3.2.2) теплофизические характеристики взаимодействующих веществ изменяются в пределах 15% [96]. Этими изменениями в первом приближении можно пренебречь.

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

3.3. Математическая модель

Нестационарные дифференциальные уравнения, описывающие согласно общим положениям [97–100] процесс конденсации рабочего тела в трубках конденсаторной установки (рис. 2.1.1) и соответствующие сформулированной физической постановке задачи, в декартовой системе координат при $0 < t < t_1$ имеют следующий вид.

Уравнение энергии для паров рабочего вещества

($0 < x < x_1, 0 < y < y_1$):

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} + U_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} + V_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right). \quad (3.3.1)$$

Уравнение теплопроводности для пленки конденсата

($0 < x < x_1, y_1 < y < y_2$):

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right). \quad (3.3.2)$$

Уравнение теплопроводности для стенки трубки

($0 < x < x_1, y_2 < y < y_3$):

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = a_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right). \quad (3.3.3)$$

Уравнение диффузии паров рабочего вещества ($0 < x < x_1$, $0 < y < y_1$):

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} + U_1 \frac{\partial C_v}{\partial x} + V_1 \frac{\partial C_v}{\partial y} = D_1 \left(\frac{\partial^2 C_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2} \right). \quad (3.3.4)$$

Уравнение движения паров рабочего вещества ($0 < x < x_1$, $0 < y < y_1$):

$$\rho_1 U_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} + \rho_1 V_1 \frac{\partial U_1}{\partial y} = - \frac{\partial P_1}{\partial x} + \mu_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2}. \quad (3.3.5)$$

Уравнение неразрывности паров рабочего вещества ($0 < x < x_1$, $0 < y < y_1$):

$$\frac{\partial \rho_1 U_1}{\partial x} + \frac{\partial \rho_1 V_1}{\partial y} = 0. \quad (3.3.6)$$

Уравнение состояния паров рабочего вещества ($0 < x < x_1$, $0 < y < y_1$):

$$P_1(x, y) = \frac{\rho_1(x, y)}{M_1} \cdot R_1 \cdot T_1(x, y). \quad (3.3.7)$$

Начальные условия ($t=0$): $T_1=T_0$ при $0 < x < x_1$, $0 < y < y_3$;

$$C_v=0 \text{ при } 0 < x < x_1, 0 < y < y_1. \quad (3.3.8)$$

Граничные условия:

$$y=0, 0 < x < x_1 \quad \frac{\partial T_1}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial C_v}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial U_1}{\partial y} = 0; \quad (3.3.9)$$

$$y=y_1, 0 < x < x_1 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} + Q_c W_c = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}, \quad T_1 = T_2,$$

$$-\rho_1 D_1 \frac{\partial C_v}{\partial y} = W_c, \quad U_1=0, \quad V_1=0; \quad (3.3.10)$$

$$y=y_2, 0 < x < x_1 \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y}, \quad T_2 = T_3; \quad (3.3.11)$$

$$y=y_3, 0 < x < x_1 \quad \alpha(T_3 - T_{\text{out}}) = \lambda_3 \left(\frac{\partial T_3}{\partial y} \right); \quad (3.3.12)$$

$$x=0, 0 < y < y_1 \quad T_1=T_{\text{input}}, \quad U_1=U_0, \quad V_1=V_0, \quad C_v=C_0; \quad (3.3.13)$$

$$x=x_1, 0 < y < y_1 \quad \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 C_v}{\partial x^2} = 0; \quad (3.3.14)$$

$$x=0, x=x_1, y_1 < y < y_2 \quad \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0; \quad (3.3.15)$$

$$x=0, x=x_1, y_2 < y < y_3 \quad \frac{\partial T_3}{\partial x} = 0. \quad (3.3.16)$$

Плотность пара в трубке конденсатора вычислялась по формуле [100]:

$$\rho_1 = M_1 C_v. \quad (3.3.17)$$

Скорость конденсации определялась из выражения [101]:

$$W_c = \frac{\beta}{1 - k_\beta \beta} \frac{\rho_1}{\rho_{1input}} \frac{(P_1^n - P_1)}{\sqrt{2\pi R_t T_1 / M_1}}. \quad (3.3.18)$$

В уравнениях (3.3.1)–(3.3.18) приняты следующие обозначения: T – температура, К; t – время, с; x, y – координаты декартовой системы координат, м; U, V – компоненты скорости в проекции на оси x и y , м/с; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; C_v – молярная концентрация, моль/м³; D – коэффициент диффузии, м²/с; ρ – плотность, кг/м³; P – давление, Н/м²; μ – коэффициент динамической вязкости, кг/(мс); M – молярная масса, кг/моль; R_t – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T_0 – начальная температура, К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); Q_c – скрытая энергия фазового перехода, Дж/кг; W_c – скорость конденсации, кг/(м²·с); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); T_{out} – температура окружающей среды, К; T_{input} – температура паров на входе в канал, К; U_0, V_0 – начальные распределения скорости, м/с; C_0 – концентрация пара на входе в канал ($C_0 = \rho_{1input} / M_1$), моль/м³; ρ_{1input} – плотность пара на входе в канал, кг/м³; β – безразмерный коэффициент конденсации ($\beta = 0,1$ [102]); k_β – дополнительный коэффициент, равный 0,4 [103]; P^n – давление насыщенных паров, Н/м²; индексы «1», «2», «3» соответствуют парам дихлорбензола, его жидкой фазе и материалу труб конденсатора.

3.4. Методы решения

Для решения системы нестационарных дифференциальных уравнений (3.3.1) – (3.3.6) с соответствующими начальными и граничными условиями (3.3.8) – (3.3.16) применен метод конечных разностей [104–108]. Разностные аналоги дифференциальных уравнений решены локально–одномерным методом [104]. Одномерные разностные уравнения решены методом прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы [104]. Уравнения движения и неразрывности, записанные в рамках модели пограничного слоя, решены по методике [97]. При решении нелинейных уравнений применялся метод итераций [109].

Для повышения точности решения количество пространственных узлов по каждой из координат выбиралось не менее 400. Вычисления проводились сквозной прогонкой через область решения (рис. 3.3.1).

3.5. Решение уравнений энергии и теплопроводности

Уравнение энергии для пара рабочего вещества имеет вид:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} + U_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} + V_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right). \quad (3.5.1)$$

При использовании аппроксимации второго порядка выполнялся переход к разностной форме дифференциального уравнения (3.5.1) [104]:

$$\frac{T_{li,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{li,j}^n}{\tau} + U_1 \frac{T_{li+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{li-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_x} = a_1 \left(\frac{T_{li+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2 \cdot T_{li,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{li-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_x^2} \right), \quad (3.5.2)$$

$$\frac{T_{li,j}^{n+1} - T_{li,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} + V_1 \frac{T_{li,j+1}^{n+1} - T_{li,j-1}^{n+1}}{2h_y} = a_1 \left(\frac{T_{li,j+1}^{n+1} - 2 \cdot T_{li,j}^{n+1} + T_{li,j-1}^{n+1}}{h_y^2} \right). \quad (3.5.3)$$

Разностные уравнения сводились к трехдиагональному виду и решались методом прогонки [104]:

$$A_{1i} \cdot T_{li+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_{1i} \cdot T_{li,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{1i} \cdot T_{li-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_{1i}, \quad (3.5.4)$$

$$A_{1j} \cdot T_{li,j+1}^{n+1} - B_{1j} \cdot T_{li,j}^{n+1} + C_{1j} \cdot T_{li,j-1}^{n+1} = F_{1j}, \quad (3.5.5)$$

где

$$A_{1i} = \frac{U_1}{h_x} - \frac{a_1}{h_x^2}; \quad (3.5.6)$$

$$B_{1i} = -\left[\frac{1}{\tau} - \frac{U_1}{h_x} + \frac{2a_1}{h_x^2} \right]; \quad (3.5.7)$$

$$C_{1i} = -\frac{a_1}{h_x^2}; \quad (3.5.8)$$

$$F_{1i} = \frac{T_{li,j}^n}{\tau}; \quad (3.5.9)$$

$$A_{1j} = \frac{V_1}{h_y} - \frac{a_1}{h_y^2}; \quad (3.5.10)$$

$$B_{1j} = -\left[\frac{1}{\tau} - \frac{V_1}{h_y} + \frac{2a_1}{h_y^2} \right]; \quad (3.5.11)$$

$$C_{1j} = -\frac{a_1}{h_y^2}; \quad (3.5.12)$$

$$F_{1j} = \frac{T_{li,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau}. \quad (3.5.13)$$

На первом полушаге по времени из граничных условий на левой границе области решения уравнения энергии вычислялись прогоночные коэффициенты α_0 и β_0 . Далее прямой прогонкой определялись коэффициенты α_i и β_i в каждом узле сетки [104]. После нахождения значений температуры на правой границе области решения уравнения энергии из соответствующего граничного условия выполнялась обратная прогонка, в ходе которой определялись значения температуры в каждом узле сетки. Таким образом решалась система уравнений (3.5.2), (3.5.6)–(3.5.9). На втором полушаге по времени аналогично решалась система уравнений (3.5.3), (3.5.10)–(3.5.13).

Уравнения теплопроводности для пленки конденсата и стенки трубки конденсатора имеют вид:

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right), \quad (3.5.14)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = a_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right). \quad (3.5.15)$$

Ниже в качестве примера рассмотрена процедура численного решения уравнения (3.5.14).

При использовании аппроксимации второго порядка выполнялся переход к разностной форме дифференциального уравнения (3.5.14) [104]:

$$\frac{T_{2i,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{2i,j}^n}{\tau} = a_2 \left(\frac{T_{2i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2 \cdot T_{2i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{2i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_x^2} \right), \quad (3.5.16)$$

$$\frac{T_{2i,j}^{n+1} - T_{2i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} = a_2 \left(\frac{T_{2i,j+1}^{n+1} - 2 \cdot T_{2i,j}^{n+1} + T_{2i,j-1}^{n+1}}{h_y^2} \right). \quad (3.5.17)$$

Разностные уравнения сводились к трехдиагональному виду и решались методом прогонки [104]:

$$A_{2i} \cdot T_{2i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_{2i} \cdot T_{2i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{2i} \cdot T_{2i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_{2i}, \quad (3.5.18)$$

$$A_{2j} \cdot T_{2i,j+1}^{n+1} - B_{2j} \cdot T_{2i,j}^{n+1} + C_{2j} \cdot T_{2i,j-1}^{n+1} = F_{2j}, \quad (3.5.19)$$

где

$$A_{2i} = -\frac{a_2}{h_x^2}; \quad (3.5.20)$$

$$B_{2i} = -\left[\frac{1}{\tau} + \frac{2a_2}{h_x^2} \right]; \quad (3.5.21)$$

$$C_{2i} = -\frac{a_2}{h_x^2}; \quad (3.5.22)$$

$$F_{2i} = \frac{T_{2i,j}^n}{\tau}; \quad (3.5.23)$$

$$A_{2j} = -\frac{a_2}{h_y^2}; \quad (3.5.24)$$

$$B_{2j} = -\left[\frac{1}{\tau} + \frac{2a_2}{h_y^2} \right]; \quad (3.5.25)$$

$$C_{2j} = -\frac{a_2}{h_y^2}; \quad (3.5.26)$$

$$F_{2j} = \frac{T_{2ij}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau}. \quad (3.5.27)$$

Алгоритм решения разностных уравнений (3.5.18) и (3.5.19) с соответствующими прогоночными коэффициентами аналогичен уравнениям (3.5.4) и (3.5.5).

3.6. Решение уравнения диффузии

Уравнение диффузии паров рабочего вещества имеет вид:

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} + U_1 \frac{\partial C_v}{\partial x} + V_1 \frac{\partial C_v}{\partial y} = D_1 \left(\frac{\partial^2 C_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2} \right). \quad (3.6.1)$$

При использовании аппроксимации второго порядка выполнялся переход к разностной форме дифференциального уравнения (3.6.1) [104]:

$$\frac{C_{vi,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{vi,j}^n}{\tau} + U_1 \frac{C_{vi+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{vi-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2h_x} = D_1 \left(\frac{C_{vi+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2 \cdot C_{vi,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{vi-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_x^2} \right), \quad (3.6.2)$$

$$\frac{C_{vi,j}^{n+1} - C_{vi,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} + V_1 \frac{C_{vi,j+1}^{n+1} - C_{vi,j-1}^{n+1}}{2h_y} = D_1 \left(\frac{C_{vi,j+1}^{n+1} - 2 \cdot C_{vi,j}^{n+1} + C_{vi,j-1}^{n+1}}{h_y^2} \right). \quad (3.6.3)$$

Разностные уравнения сводились к трехдиагональному виду и решались методом прогонки [104]:

$$A_{wi} \cdot C_{vi+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_{wi} \cdot C_{vi,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{wi} \cdot C_{vi-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_{wi}, \quad (3.6.4)$$

$$A_{wj} \cdot C_{vi,j+1}^{n+1} - B_{wj} \cdot C_{vi,j}^{n+1} + C_{wj} \cdot C_{vi,j-1}^{n+1} = F_{wj}, \quad (3.6.5)$$

где

$$A_{wi} = \frac{U_1}{h_x} - \frac{D_1}{h_x^2}; \quad (3.6.6)$$

$$B_{wi} = -\left[\frac{1}{\tau} - \frac{U_1}{h_x} + \frac{2D_1}{h_x^2} \right]; \quad (3.6.7)$$

$$C_{wi} = -\frac{D_1}{h_x^2}; \quad (3.6.8)$$

$$F_{wi} = \frac{C_{vi,j}^n}{\tau}; \quad (3.6.9)$$

$$A_{wj} = \frac{V_1}{h_y} - \frac{D_1}{h_y^2}; \quad (3.6.10)$$

$$B_{wj} = -\left[\frac{1}{\tau} - \frac{V_1}{h_y} + \frac{2D_1}{h_y^2} \right]; \quad (3.6.11)$$

$$C_{wj} = -\frac{D_1}{h_y^2}; \quad (3.6.12)$$

$$F_{wj} = \frac{C_{vli,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau}. \quad (3.6.13)$$

Алгоритм решения разностных уравнений (3.6.4) и (3.6.5) с соответствующими прогоночными коэффициентами аналогичен уравнениям (3.5.4) и (3.5.5).

3.7. Решение уравнений движения и неразрывности

Уравнение движения паров рабочего вещества имеет вид:

$$\rho_1 U_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} + \rho_1 V_1 \frac{\partial U_1}{\partial y} = -\frac{\partial P_1}{\partial x} + \mu_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2}. \quad (3.7.1)$$

При использовании аппроксимации второго порядка выполнялся переход к разностной форме дифференциального уравнения (3.7.1) [104]:

$$\begin{aligned} \rho_1 U_{li+\frac{1}{2},j} \frac{U_{li+1,j} - U_{li,j}}{h_x} + \rho_1 V_{li+\frac{1}{2},j} \frac{S(U_{li+1,j+1} - U_{li+1,j-1}) + (1-S)(U_{li,j+1} - U_{li,j-1})}{2h_y} = -\frac{P_{li+1} - P_{li}}{h_x} + \\ + \frac{\mu_1}{h_y^2} \left[S(U_{li+1,j-1} - 2U_{li+1,j} + U_{li+1,j+1}) + (1-S)(U_{li,j-1} - 2U_{li,j} + U_{li,j+1}) \right], \end{aligned} \quad (3.7.2)$$

где S – порядок усреднения (согласно [97] принимался равным 0,5), $U_{li+\frac{1}{2},j}$,

$V_{li+\frac{1}{2},j}$ – значения скоростей U_1 и V_1 на «полуцелом» шаге (

$U_{li+\frac{1}{2},j} = (U_{li,j} + U_{li+1,j})/2$, значение $V_{li+\frac{1}{2},j}$ вычислялось итерационно при

решении уравнения неразрывности (3.3.6) по методике широко применяемой для решения уравнений пограничного слоя [97]).

Разностное уравнение (3.7.2) сводилось к трехдиагональному виду и решалось методом прогонки [104]:

$$A_{uj} \cdot U_{li+1,j-1} + B_{uj} \cdot U_{li+1,j} + C_{uj} \cdot U_{li+1,j+1} = F_{uj}, \quad (3.7.3)$$

где

$$A_{uj} = \frac{\mu_1 S}{2h_y} \left(\frac{2}{h_y} + V_{li+\frac{1}{2},j} \right); \quad (3.7.4)$$

$$B_{uj} = -\frac{2\mu_1}{h_y^2} S - \frac{\rho_1}{h_x} V_{li+\frac{1}{2},j}; \quad (3.7.5)$$

$$C_{uj} = \frac{\mu_1 S}{2h_y} \left(\frac{2}{h_y} - V_{li+\frac{1}{2},j} \right); \quad (3.7.6)$$

$$F_{uj} = -\frac{\rho_1}{h_x} U_{li+\frac{1}{2},j} U_{li,j} + \frac{P_{li+1} - P_{li}}{h_x} - \frac{\mu_1}{h_y^2} (1-S)(U_{li,j-1} - 2U_{li,j} + U_{li,j+1}) + \\ + V_{li+\frac{1}{2},j} \frac{(1-S)}{2h_y} (U_{li,j+1} - U_{li,j-1}). \quad (3.7.7)$$

При использовании модели пограничного слоя для решения уравнений движения (3.3.5) и неразрывности (3.3.6) выполнялась процедура «гладкого сопряжения» [97] на границах $y=0$, $0 < x < x_1$ и $y=y_1$, $0 < x < x_1$ (выполнялись итерационные вычисления скоростей U_1 и V_1 с заданной точностью – 5 % от максимального значения). Кроме того выполнялись итерации «по нелинейности» [97] для значений U_1 и V_1 на полуцелых шагах разностной сетки.

3.8. Алгоритм решения задачи тепломассопереноса при конденсации органического рабочего вещества в замкнутом цикле мини-ТЭС

1. На первом шаге по времени строился итерационный цикл для определения температурного поля в рассматриваемой системе (рис. 3.2.1). В качестве начального приближения задавалось значение сеточной функции на

предшествующем временном слое. Итерационный цикл заканчивался при условии:

$$\max |T^{(m)} - T^{(m-1)}| \leq \varepsilon, \quad (3.8.1)$$

где ε – заданное допустимое отклонение, m – номер итерации.

Если в результате итерационного цикла требуемая точность вычислений не достигалась, то полученное приближение $T^{(m)}$ задавалось в качестве начального в системе разностных аналогов уравнений энергии и теплопроводности (п. 3.5) для определения очередного приближения $T^{(m+1)}$. При достижении заданной точности вычислений выполнялся переход к следующему временному слою.

Для достижения сходимости итерационного цикла в условиях высоких скоростей протекания фазовых переходов, схема итерационного алгоритма дополнялась процедурой «осреднения итераций» [110]. Вводился итерационный коэффициент последовательного осреднения γ . В этом случае значение искомой функции $T_*^{(m+1)}$, вводимое на каждой итерации в качестве последнего приближения в соответствующие разностные операторы, отличалось от фактически вычисленного на последней итерации значения $T^{(m+1)}$ и вычислялось для каждого узла итерационной сетки по формуле:

$$T_*^{(m+1)} = T^{(m)} + \gamma \cdot (T^{(m+1)} - T^{(m)}), \quad 0 < \gamma < 1. \quad (3.8.2)$$

Введение такой процедуры приводило к существенному снижению скорости сходимости итераций в процессе решения системы уравнений (3.3.1)–(3.3.6), но обеспечивало сходимость.

В выполняемых расчётах точность вычислений температуры принималась $\varepsilon=0,5$ К, что составляет 0,2 % от минимально возможной в данной постановке температуры $T=250$ К. На каждом шаге итерации, пока не выполнялось условие вида (3.8.1), решение проводилось по методике, изложенной в п. 3.5.

2. Поле молярных концентраций паров рабочего вещества C_v вычислялось согласно п. 3.6.

3. Поля скоростей паров рабочего вещества в трубке U_1 и V_1 определялись аналогично температурному и концентрационному полям. На каждом шаге итерации, пока не выполнялось условие вида (3.8.1) для скоростей, решение проводилось по методике, изложенной в пункте 3.7.

4. Из уравнения (3.3.17) при известных C_v вычислялись значения плотности паров ρ_1 в каждом узле канала.

5. Из уравнения состояния (3.3.7) при известных ρ_1 и T_1 вычислялись значения давления P_1 .

6. С использованием выражения (3.3.18) определялись значения скорости конденсации W_c .

7. Для контроля точности проводимых вычислений на каждом шаге по времени выполнялась оценка достоверности полученных результатов по методике, изложенной в пункте 3.9.

8. Затем происходил переход на следующий шаг по времени и реализовывались вычисления согласно п. 1–7 настоящего алгоритма.

3.9. Оценка достоверности полученных результатов

Одним из этапов оценки достоверности полученных в ходе вычислений результатов являлась проверка консервативности используемой разностной схемы. Оценивалась точность выполнения закона сохранения энергии в выделенной области решения задачи (рис. 3.2.1).

Погрешность по балансу энергии (%) определялась из выражения:

$$\xi = \frac{Q_{st} + Q_{cond} - Q_{ac.c} - Q_{ac.v} - Q_{ac.w} - Q_a}{Q_{st} + Q_{cond}} \cdot 100, \quad (3.9.1)$$

где Q_{st} – теплота, которой обладает поток рабочего вещества на входе в трубку конденсатора, Дж; Q_{cond} – теплота, выделяющаяся в результате фазового перехода, Дж; $Q_{ac.c}$ – теплота, аккумулированная в конденсате, Дж/кг; $Q_{ac.v}$ – теплота, аккумулированная в паре, Дж; $Q_{ac.w}$ – теплота, аккумулированная в материале стенки трубки конденсатора, Дж; Q_a –

теплота, отведённая от поверхности трубки конденсатора в окружающую среду, Дж.

Теплота, которую вносит в систему поток рабочего вещества на входе в конденсатор за время $K \cdot \Delta t$:

$$Q_{st} = 0.5 \cdot G_1 \cdot C_1 \cdot T_{input} \cdot K \cdot \Delta t. \quad (3.9.2)$$

Теплота, выделяющаяся в результате фазового перехода (конденсации):

$$Q_{cond} = \sum_{i=1}^{N_{x1}} Q_c \cdot W_c \cdot K \cdot \Delta t \cdot h_x \cdot y_1. \quad (3.9.3)$$

Теплота, аккумулированная в конденсате:

$$Q_{ac.c} = \sum_{j=M_{y1}}^{M_{y2}} \sum_{i=1}^{N_{x1}} C_2 \cdot \rho_2 \cdot (T_{2i,j,k} - T_{2i,j,k-1}) \cdot h_x \cdot h_y \cdot y_2. \quad (3.9.4)$$

Теплота, аккумулированная в паре:

$$Q_{ac.v} = \sum_{j=0}^{M_{y1}} \sum_{i=1}^{N_{x1}} C_1 \cdot \rho_1 \cdot (T_{1i,j,k} - T_{1i,j,k-1}) \cdot h_x \cdot h_y \cdot y_1. \quad (3.9.5)$$

Теплота, аккумулированная в материале стенки:

$$Q_{ac.w} = \sum_{j=M_{y2}}^{M_{y3}} \sum_{i=1}^{N_{x1}} C_3 \cdot \rho_3 \cdot (T_{3i,j,k} - T_{3i,j,k-1}) \cdot h_x \cdot h_y \cdot y_3. \quad (3.9.6)$$

Теплота, отведённая от поверхности трубки конденсатора в окружающую среду за время $K \cdot \Delta t$:

$$Q_a = \sum_{i=1}^{N_{x1}} \alpha_4 [T_{3i,y_3} - T_{out}] \cdot h_x \cdot y_3 \cdot K \cdot \Delta t. \quad (3.9.7)$$

Здесь G_1 – массовый расход рабочего вещества, кг/с; C – теплоемкость, Дж/(кг·К); T_{input} – температура рабочего вещества на входе в конденсатор, К; i и j – номера узлов координатной сетки по оси x и y соответственно; k – номер узла временной сетки; N_x и M_y – число узлов координатной сетки по оси x и y соответственно; K – число шагов по времени; Δt – шаг по времени, с.

Установлено, что при уменьшении шага по времени Δt значительно уменьшается погрешность по балансу энергии в рассматриваемой системе. Для получения достаточно высокой точности вычислений можно рекомендовать к использованию шаг по времени $\Delta t=10^{-6}-10^{-4}$ с.

Анализ влияния величины шага по пространственным координатам на погрешность выполнения баланса энергии (3.9.1) показал, что при шаге по времени $\Delta t=10^{-4}$ и поперечном размере области решения задачи $H=22$ мм сетка 400×400 дает приемлемый результат. Дальнейшее измельчение сетки не влечет за собой существенных отклонений в результатах вычислений.

3.10. Решение тестовых задач

Тестирование алгоритма решения основной задачи тепломассопереноса в условиях фазовых переходов выполнено на ряде менее сложных нестационарных задач теплопроводности [111].

3.10.1. Одномерный теплоперенос в плоской бесконечной пластине с фазовым переходом на границе

Рассматривался процесс теплопроводности в пластине с сублимацией на двух границах трифторида алюминия AlF_3 [111] (рис. 3.10.1.1). Толщина пластины $L=0.3$ м. Трифторид алюминия имеет следующие теплофизические характеристики: $\lambda=60$ Вт/(м·К); $\rho=3070$ кг/м³; $C=1260$ Дж/(кг·К); $M=0,084$ кг/моль; $A=0,1$; $P_0=10^5$ Па; $q=10^6$ Вт/м²; $Q_e=3,8 \cdot 10^4$ Дж/кг. Начальная температура области решения $T_0=1000$ К. Необходимо определить температурные поля в пластине через 60, 120, 300 с.

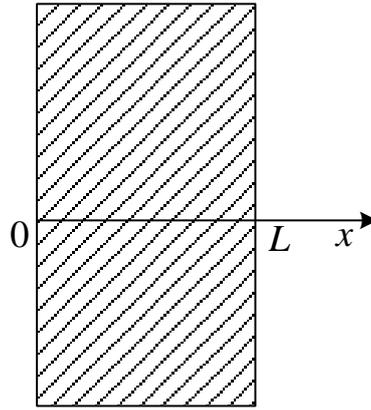


Рисунок 3.10.1.1. Геометрия задачи

Уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < L. \quad (3.10.1.1)$$

Начальные и граничные условия:

$$t = 0, \quad 0 \leq x \leq L: \quad T = T_0; \quad (3.10.1.2)$$

$t > 0$:

$$x = 0: \quad -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = q - W_e \cdot Q_e; \quad (3.10.1.3)$$

$$x = L: \quad \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = q - W_e \cdot Q_e. \quad (3.10.1.4)$$

Здесь $W_e = \frac{A \cdot (P^s - P^*)}{\sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot R_t \cdot T}{M}}}$ – массовая скорость сублимации; P^* – атмосферное

давление ($P^* = P_a = 10^5$ Па); $P^s = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q_e}{R_t \cdot T}\right)$ – давление насыщенного

пара; A – коэффициент аккомодации; Q_e – теплота фазового перехода;

R_t – универсальная газовая постоянная ($R_t = 8,31$ Дж/(моль·К));

M – молекулярная масса вещества.

На рисунке 3.10.1.2 представлены распределения температуры по толщине пластины в различные моменты времени, полученные в результате

численного решения задачи с шагом по координате $h_x = 1 \cdot 10^{-4}$ м и шагом по времени $\tau = 1 \cdot 10^{-3}$ с.

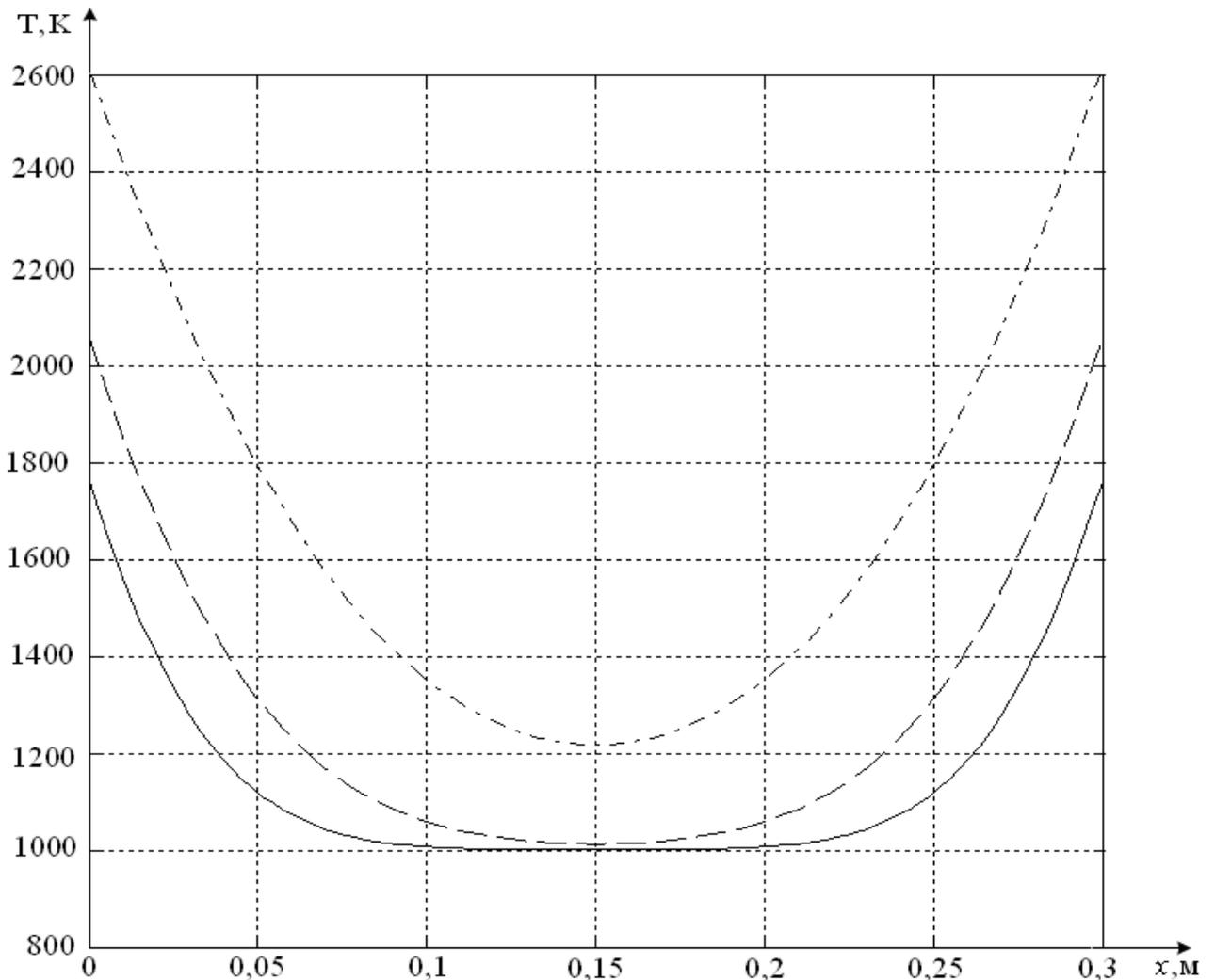


Рисунок 3.10.1.2. Распределения температуры (К) по толщине пластины в различные моменты времени (— при $t = 60$ с, -- при $t = 120$ с, --- при $t = 300$ с)

Для тестирования полученных распределений в таблице 3.10.1.1 приведены результаты работы [111].

Результаты сравнения распределений температуры (К)

x , м	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30
Результаты настоящей работы	1165	1045	1000	1045	1165	1761
Результаты работы [111]	1170	1048	1000	1048	1170	1761
Отклонение, %	0,43	0,28	0	0,28	0,43	0

3.10.2. Одномерный теплоперенос в плоской двухслойной бесконечной пластине

Рассматривался теплоперенос в двухслойном бесконечном теле, представляющем собой совокупность двух пластин с различными теплофизическими характеристиками [111] (рис. 3.10.2.1). Одна часть пластины (1) выполнена из стали ($\lambda_1=46$ Вт/(м·К)), $\rho=7800$ кг/м³, $C_1=460$ Дж/(кг·К)), а другая (2) – из меди ($\lambda_1=384$ Вт/(м·К), $\rho=8800$ кг/м³, $C_1=381$ Дж/(кг·К)). Толщина пластины $L=0,3$ м. Толщины составных частей пластины принимались одинаковыми. Начальная температура области решения $T_0=283$ К. На границе $x=0$ поддерживалась постоянная температура $T=373$ К, а на границе $x=L$ – $T=323$ К. Требовалось определить температурное поле в пластине через 30, 180 и 600 секунд.

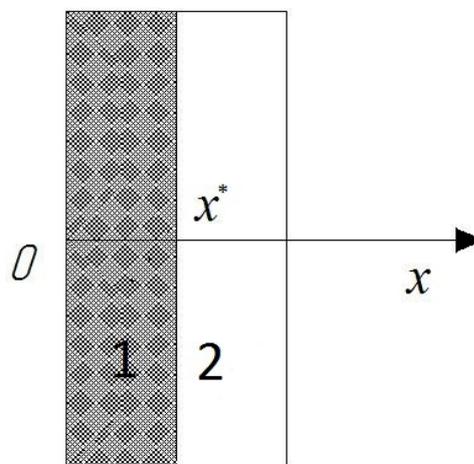


Рисунок 3.10.2.1. Геометрия задачи

Система уравнений теплопроводности имеет вид:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < x^*; \quad (3.10.2.1)$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, x^* < x < L. \quad (3.10.2.2)$$

Начальные и граничные условия:

$t=0, 0 \leq x \leq L:$

$$T = T_0; \quad (3.10.2.3)$$

$t > 0:$

$$x=0: T = T_{л}; \quad (3.10.2.4)$$

$$x=L: T = T_{п}. \quad (3.10.2.5)$$

$$\begin{cases} T_1(t, x^*) = T_2(t, x^*); \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x^*} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x^*} \end{cases}. \quad (3.10.2.6)$$

Для тестирования полученных распределений в таблице 3.10.2.1 приведены результаты работы [111].

Таблица 3.10.2.1

Результаты сравнения распределений температуры при $t=180$ с

$x, м$	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
Результаты настоящей работы	373,00	326,01	303,66	311,57	313,57	317,92	323,00
Результаты работы [111]	373,00	326,00	304,00	311,50	313,50	318,00	323,00
Отклонение, %	0	0,003	0,100	0,021	0,021	0,025	0

На рис. 3.10.2.2 представлены распределения температуры по толщине пластины в различные моменты времени, полученные в результате решения задачи с шагом по координате $h_x=10^{-4}$ м и шагом по времени $\tau=10^{-3}$ с.

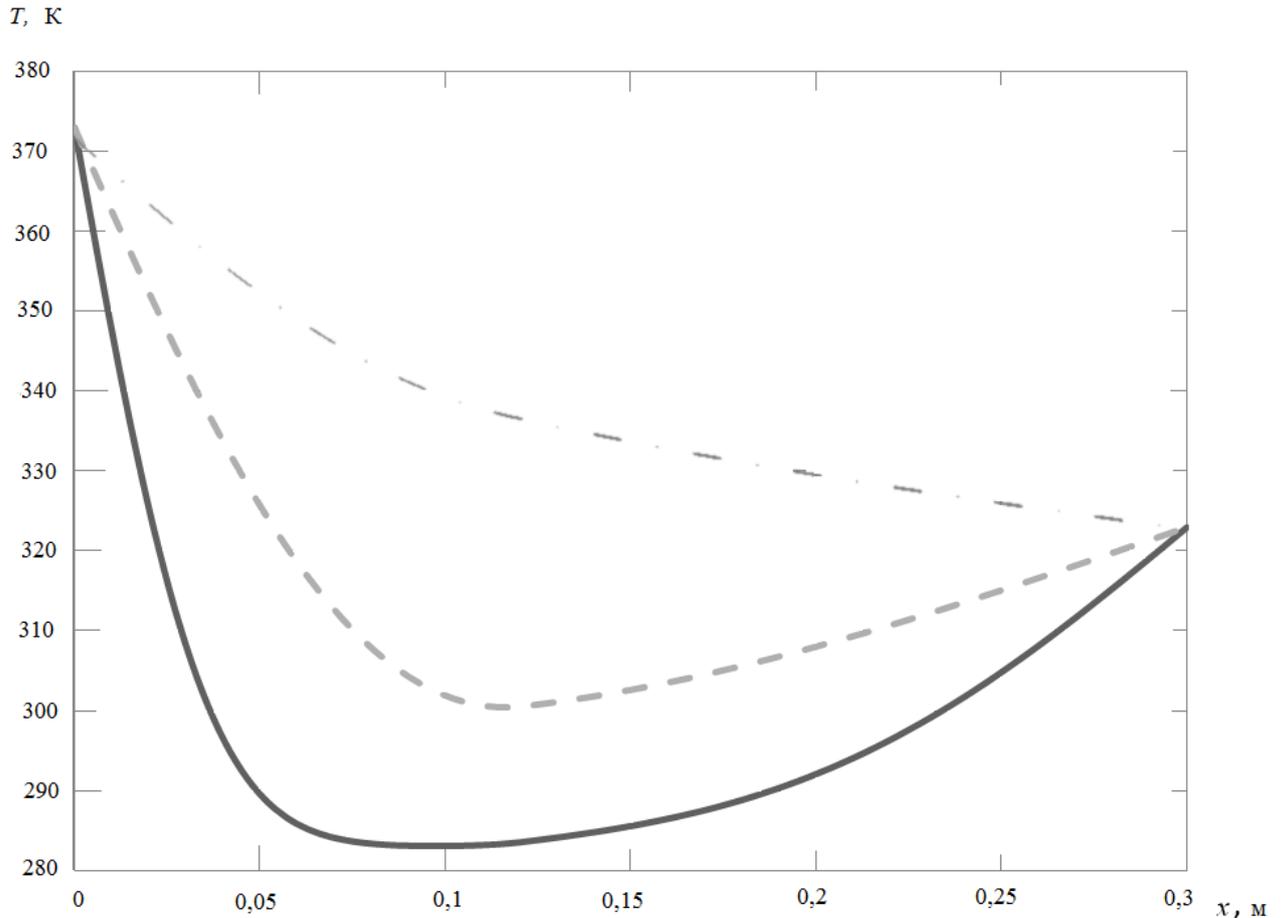


Рисунок 3.10.2.2. Распределение температуры по толщине пластины в различные моменты времени (— при $t=30$ с, -- при $t=180$ с, -.- при $t=600$ с)

3.10.3. Двумерный теплоперенос в однородной пластине

Рассматривался процесс теплопроводности в медной пластине [111] (рис. 3.10.3.1). Размеры пластины $L=H=0,5$ м. Медь имеет следующие теплофизические характеристики: $\lambda=384$ Вт/(м·К); $\rho=8800$ кг/м³; $C=381$ Дж/(кг·К). Начальная температура области решения $T_0=278$ К. На границах $y=0$ и $y=H$ теплообмен отсутствует, на вертикальных границах поддерживаются постоянные температуры $T_h=353$ К и $T_c=303$ К.

Необходимо определить распределение температуры в пластине через 60 секунд.

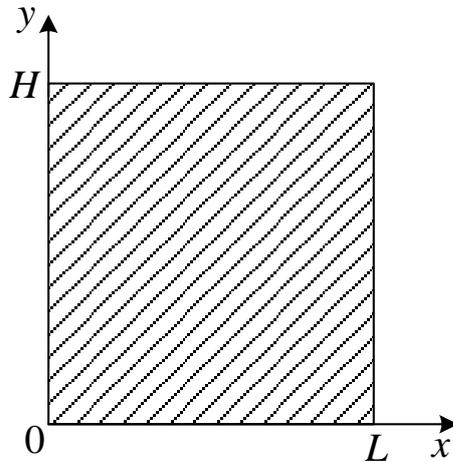


Рисунок 3.10.3.1. Геометрия задачи

Уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad 0 < x < L, \quad 0 < y < H. \quad (3.10.3.1)$$

Граничные и начальные условия:

$$t = 0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad 0 \leq y \leq H : T = T_0; \quad (3.10.3.2)$$

$$t > 0 : x = 0 : T = T_h; \quad (3.10.3.3)$$

$$x = L : T = T_c; \quad (3.10.3.4)$$

$$y = 0 : \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \quad (3.10.3.5)$$

$$y = H : \frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (3.10.3.6)$$

На рисунке 3.10.3.2 представлены изотермы в пластине при $t = 60$ с, полученные в результате решения задачи на сетке 100×100 с шагом по времени $\tau = 1 \cdot 10^{-3}$ с. Для тестирования полученных данных в таблице 3.10.3.1 приведены результаты работы [111].

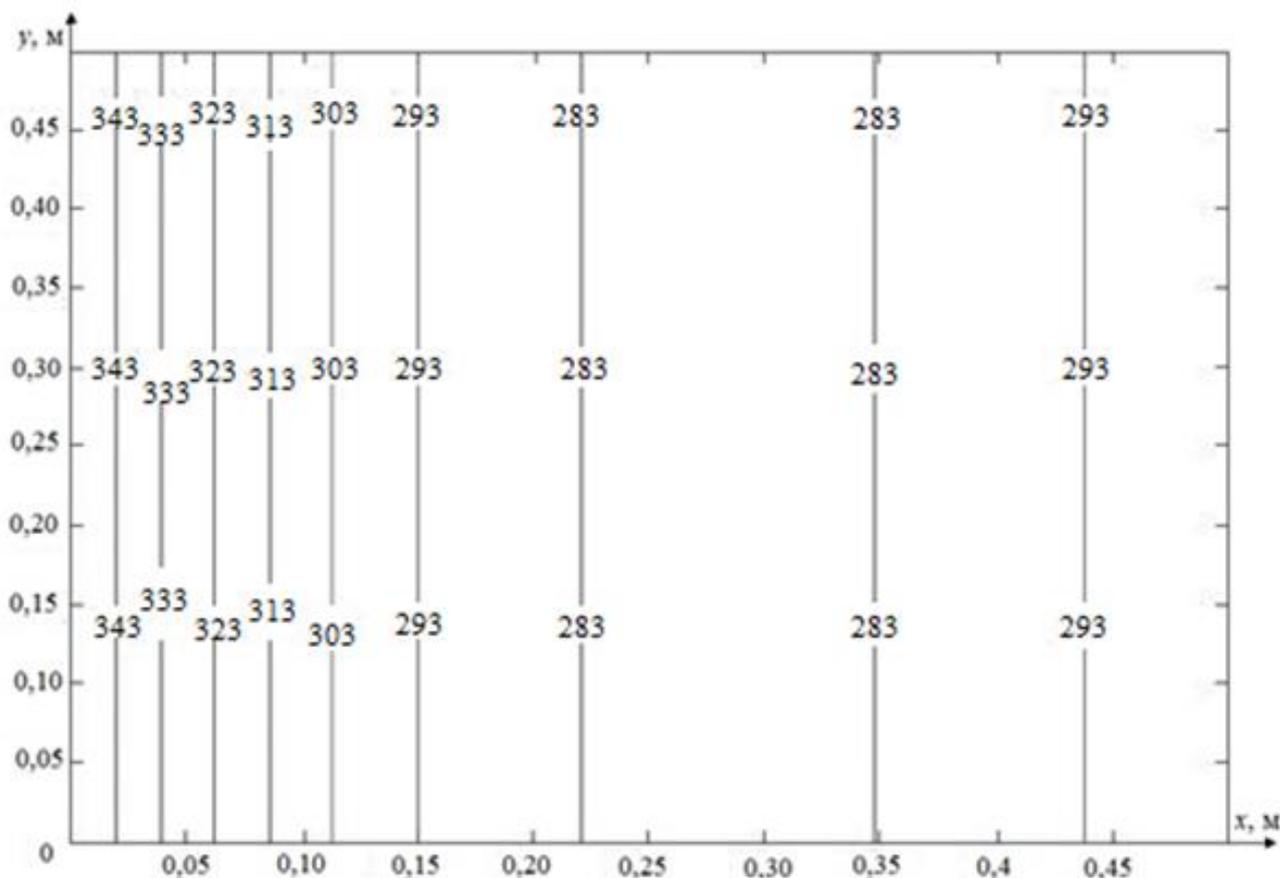


Рисунок 3.10.3.2. Изотермы (К) в пластине при $t = 60$ с

Таблица 3.10.3.1

Результаты сравнения изотерм (К) при $t=60$ с

$x, \text{ м}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Результаты настоящей работы	343	309,05	285,37	281,13	287,89	303
Результаты работы [111]	343	308,45	285,65	281,25	288,05	303
Отклонение, %	0	0,19	0,1	0,04	0,06	0

3.10.4. Двумерный теплоперенос в пластине с фазовым переходом на двух границах

Рассматривался процесс теплопроводности в пластине (рис. 3.10.4.1) с сублимацией на двух границах трифторида алюминия AlF_3 [111]. Размеры пластины $L = H = 0,3$ м. AlF_3 имеет следующие теплофизические

характеристики: $\lambda=60$ Вт/(м·К), $\rho=3070$ кг/м³, $C=1260$ Дж/(кг·К), $M=0,084$ кг/моль, $A=0,1$, $P_0=10^5$ Па, $q=10^4$ Вт/м², $Q_{и}=3,8\cdot 10^4$ Дж/кг. Начальная температура области решения $T_0=1273$ К. На границах $y=0$ и $y=H$ осуществлялся теплообмен с окружающей средой ($k=50$ Вт/(м²·К), $T^e=600$ К), две остальные границы являлись теплоизолированными. Необходимо определить положение изотерм в пластине через 120 секунд.

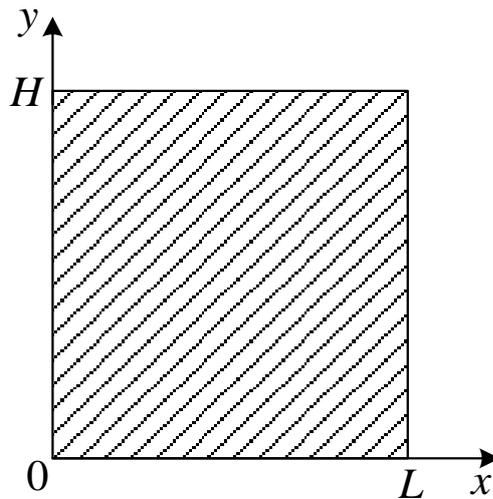


Рисунок 3.10.4.1. Геометрия задачи

Уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad 0 < x < L, \quad 0 < y < H. \quad (3.10.4.1)$$

Граничные и начальные условия:

$$t = 0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad 0 \leq y \leq H: \quad T = T_0; \quad (3.10.4.2)$$

$$t > 0: \quad x = 0, \quad 0 \leq y \leq H: \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad (3.10.4.3)$$

$$x = L, \quad 0 \leq y \leq H: \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad (3.10.4.4)$$

$$y = 0, \quad 0 \leq x \leq L: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = k(T^e - T) - w_{и} Q_{и}; \quad (3.10.4.5)$$

$$y = H, 0 \leq x \leq L: \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q - w_{и} Q_{и}. \quad (3.10.4.6)$$

На рис. 3.10.4.2 показаны изотермы в пластине при $t = 120$ с, полученные в результате решения задачи на сетке 100×100 с шагом по времени $\Delta t = 1 \cdot 10^{-3}$ с.

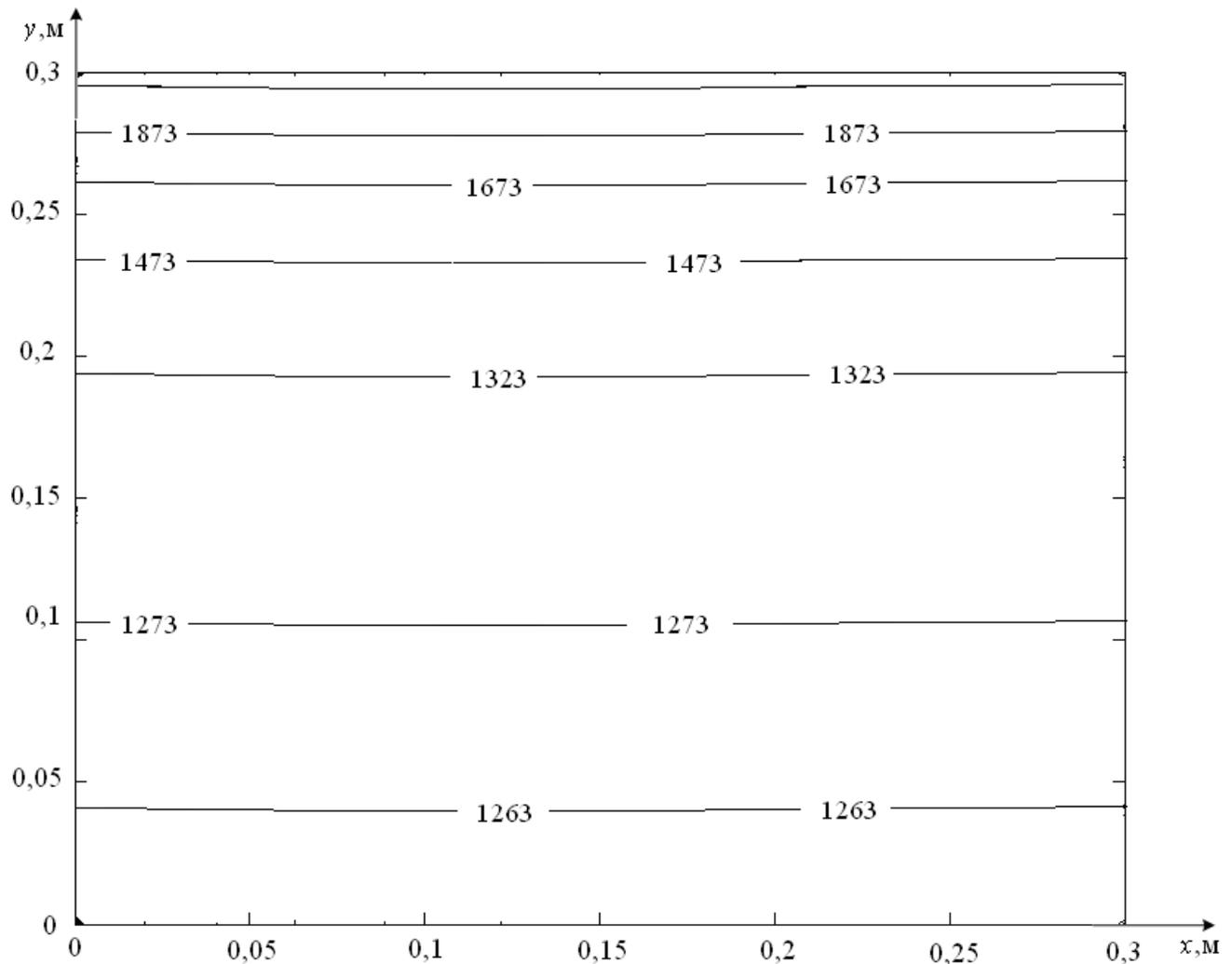


Рисунок 3.10.4.2. Изотермы (T , К) в пластине при $t = 120$ с

Для тестирования полученных данных в таблице 3.10.4.1 приведены результаты работы [111].

Таблица 3.10.4.1

Результаты сравнения изотерм (T , К) при $t = 120$ с

у, м	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
Результаты настоящей работы	873	1265,2	1270,5	1295,5	1346	1593
Результаты работы [111]	873	1265,7	1270,3	1295,1	1347,5	1591,2
Отклонение, %	0	0,04	0,01	0,03	0,11	0,12

Выводы по третьей главе

1. Сформулированы физическая и математическая модели, позволяющие численно исследовать интегральные характеристики конденсации органического рабочего вещества в конденсаторной установке рассматриваемой мини–ТЭС с учетом основных процессов и факторов.

2. Разработан алгоритм решения системы нестационарных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями для наиболее общей постановки задачи тепломассопереноса при конденсации. Описаны основные закономерности использованных методов численного решения дифференциальных уравнений в частных производных.

3. Разработан алгоритм оценки достоверности полученных результатов численных исследований. На каждом шаге по времени проверялось условие выполнения закона сохранения энергии.

4. Решена группа тестовых задач теплопроводности. Сопоставление результатов решения с данными других авторов показало хорошее согласие.

5. Полученные результаты верификации моделей проиллюстрировали корректность работы созданных алгоритмов и использованных методов численного решения основной задачи тепломассопереноса при конденсации рабочего вещества в соответствующем агрегате мини–ТЭС.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ МИНИ-ТЭС

При использовании сформулированных в третьей главе рукописи физической и математической моделей тепломассопереноса выполнен цикл численных исследований. Ниже приведены результаты моделирования и их анализ с указанием определяющих процессов и факторов.

4.1. Анализ влияния параметров рабочей среды на интегральные характеристики функционирования конденсаторной установки

Моделирование процессов тепломассопереноса и фазовых переходов выполнено для системы, представленной на рис. 4.1.1.

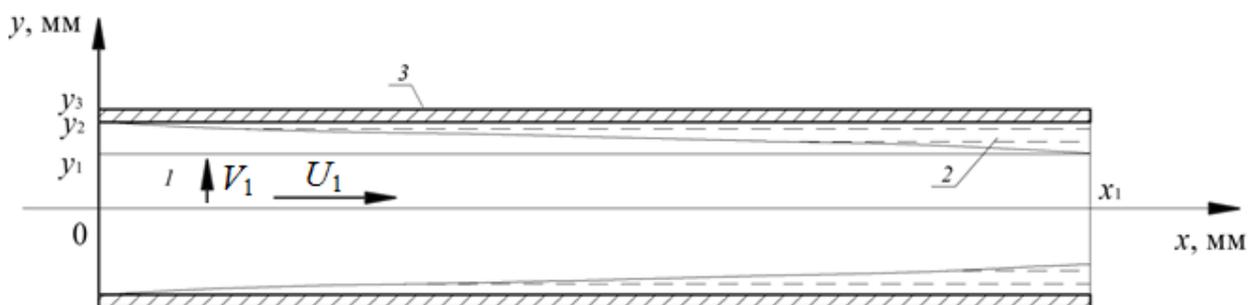


Рисунок 4.1.1. Схема области решения:

1 – пар; 2 – конденсат; 3 – стенка трубки конденсатора; 4 – окружающая среда

Рассмотрена система [112], состоящая из одиночной стальной трубки, внутри которой движется поток рабочего вещества. Снаружи трубка конденсатора омывается воздухом с заданной постоянной температурой T_{out} .

Численное моделирование исследуемого процесса выполнено при допущениях, приведённых в п. 3.2.

В качестве размеров области решения задачи тепломассопереноса приняты внешние характерные размеры трубки конденсатора: длина $H_x=1500$

мм и поперечный размер рабочего канала $H_y=22$ мм. Задача решена в декартовой системе координат в осесимметричной постановке (рис. 4.1.1).

Нестационарные дифференциальные уравнения, описывающие процессы теплопереноса при конденсации в рассматриваемой системе (рис. 4.1.1), аналогичны системе уравнений (3.3.1) – (3.3.7).

Начальные ($t=0$) и граничные условия (рис. 4.1.1) идентичны краевым условиям (3.3.8) – (3.3.16) для общей постановки задачи (п. 3.3).

Численное моделирование процессов теплопереноса в условиях интенсивных фазовых переходов выполнено при следующих значениях теплофизических характеристик взаимодействующих веществ [113–116]:

$$C_1=1300 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \rho_{\text{input}}=5,1 \text{ кг}/\text{м}^3, \lambda_1=0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$C_2=1300 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \rho_2=1300 \text{ кг}/\text{м}^3, \lambda_2=0,12 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

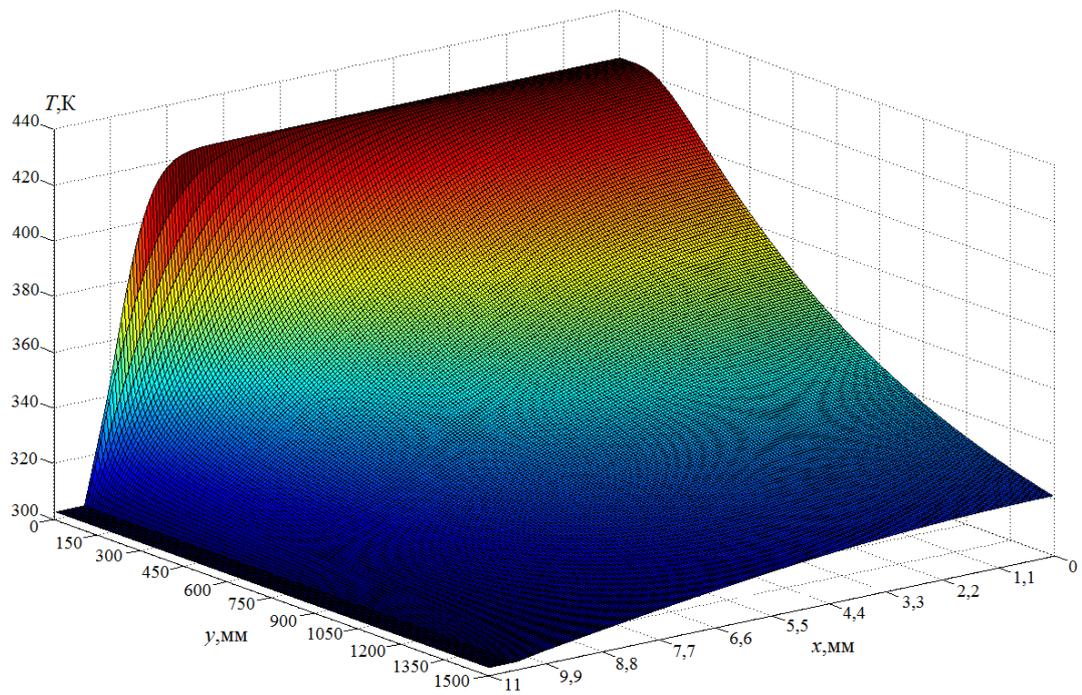
$$C_3=460 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \rho_3=7700 \text{ кг}/\text{м}^3, \lambda_3=54 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$Q_c=311,7\cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}, D_l=0,018 \text{ см}^2/\text{с}.$$

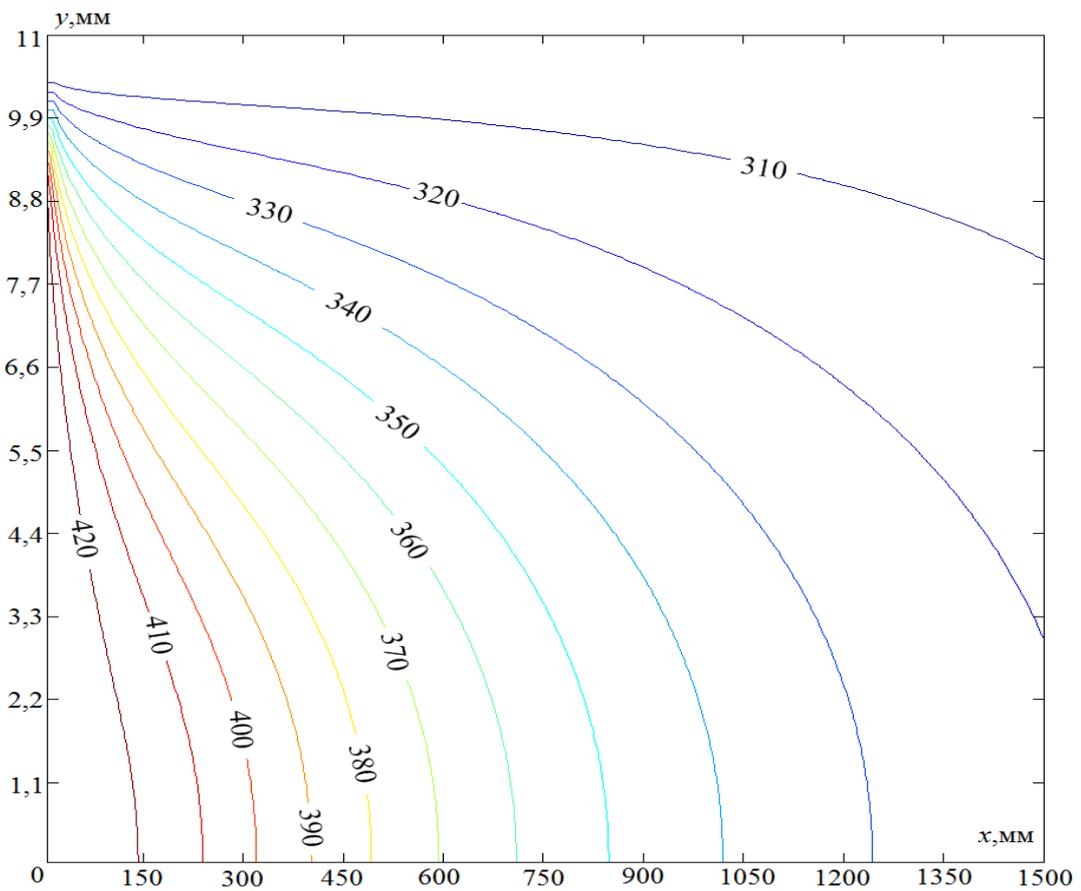
Распределение скоростей рабочего потока на входе в трубку принималось исходя из условий эксплуатации [90] следующим $U_0=0,1$ м/с; $V_0=0,01$ м/с. Температура наружного воздуха T_{out} варьировалась в широком диапазоне (от 253 К до 313 К) для моделирования экстремальных условий эксплуатации (в зимнее и летнее время). Толщина пленки конденсата δ принималась равной 1–2 мм согласно эксплуатационной документации [90].

Задачи численного анализа исследуемого процесса при использовании сформулированной модели состояли в установлении зависимостей выходной температуры рабочего потока T_{output} от основных внутренних параметров (его температуры на входе в конденсатор T_{input} , начальной скорости течения U_0 , а также теплопроводности плёнки конденсата λ_2).

В результате численного моделирования получены температурные поля. На рис. 4.1.2 приведены типичные иллюстрации с распределениями T в рассматриваемой системе.



a



б

Рис. 4.1.2. Температурное поле (*a*) и изотермы (*б*) в трубке конденсатора в момент времени $\tau=15$ с при $T_{\text{input}}=423$ К, $T_{\text{out}}=303$ К, $U_0=0,1$ м/с, $V_0=0,01$ м/с, $\lambda_2=0,12$ Вт/(м·К)

На рис. 4.1.3 приведены типичные результаты численного исследования процесса конденсации в трубке в зависимости от значения входной температуры рабочего потока в конденсаторную установку (определяется нагрузкой мини-ТЭС P_u [90]) при различных температурах наружного воздуха. Необходимо отметить, что изменение электрической мощности мини-ТЭС P_u достигается путём регулирования температуры рабочего вещества на выходе из парогенератора T_{output} (рис. 2.1.1). Данные о режимах работы источника энергоснабжения и о соответствии регламентного значения температуры рабочего вещества на входе в конденсатор значениям выходной мощности энергоустановки приведены в табл. 3.1.1.

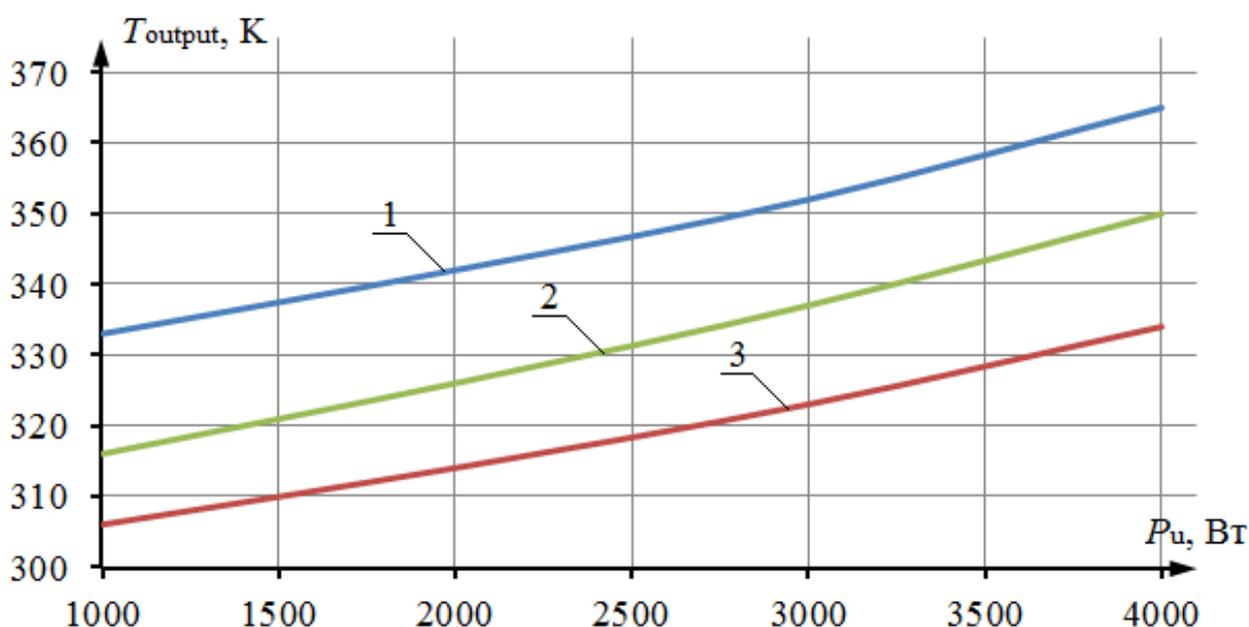


Рисунок 4.1.3. Значения выходной температуры рабочего потока T_{output} при различной мощности энергоустановки P_u :

$$1 - T_{\text{out}}=303 \text{ К}; 2 - T_{\text{out}}=273 \text{ К}; 3 - T_{\text{out}}=253 \text{ К}$$

Анализ рис. 4.1.3 показывает, что изменение выходной электрической мощности рассматриваемой мини-ТЭС оказывает влияние на процесс конденсации в трубке и выходную температуру рабочего потока T_{output} , что так же влияет на технологический процесс работы паротурбогенератора в комплексе и хорошо согласуется с эксплуатационной документацией [81, 90].

Полученный результат (рис. 4.1.3) объясняется тем, что при увеличении мощности энергоустановки скорость движения двухфазового рабочего потока через конденсаторную установку увеличивается, что влияет на процесс конденсации, и, следовательно, на выходную температуру рабочего потока из конденсатора. Полученные результаты хорошо согласуются с данными завода-изготовителя приведенными в табл. 3.1.1.

На рис. 4.1.4 приведены зависимости выходной температуры рабочего потока от коэффициента теплопроводности пленки λ_2 при различных температурах наружного воздуха.

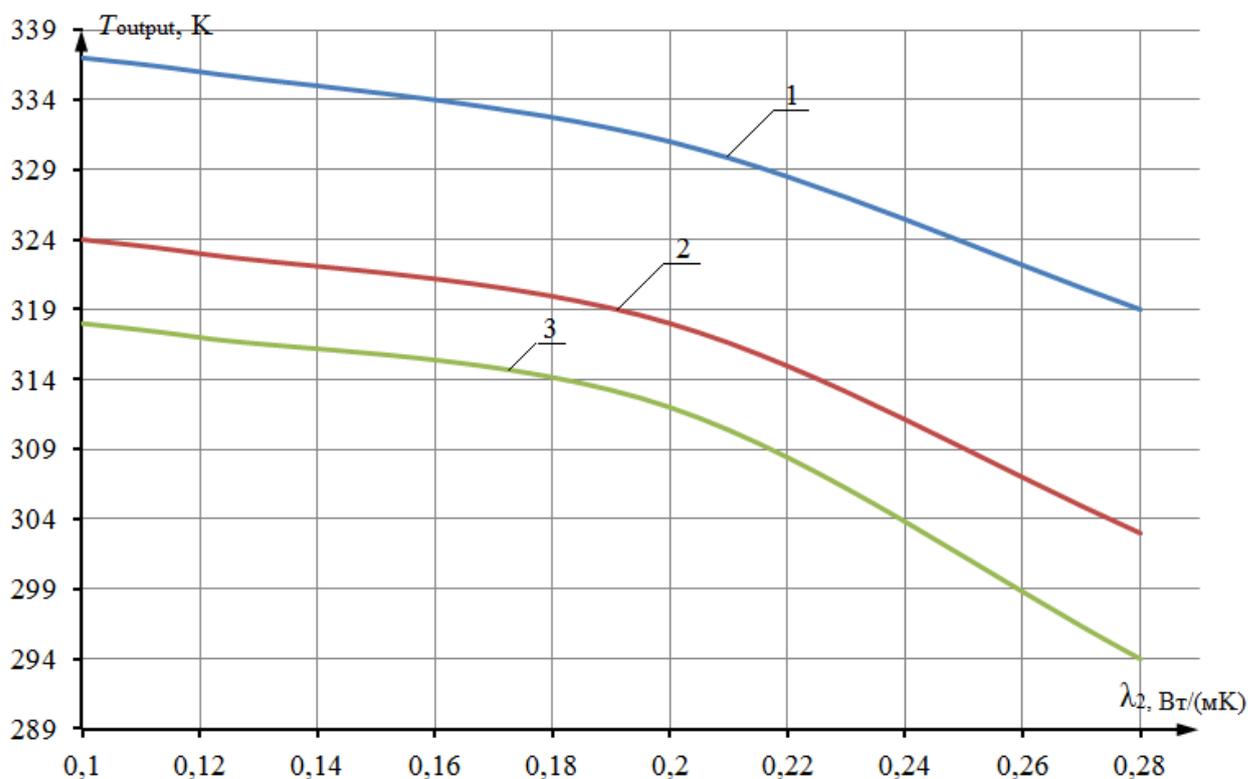


Рис. 4.1.4. Зависимости выходной температуры рабочего потока T_{output} от коэффициента теплопроводности пленки λ_2 :

1 – $T_{out}=303$ К; 2 – $T_{out}=273$ К; 3 – $T_{out}=253$ К

Установлено, что при положительных температурах наружного воздуха (кривые 1 и 2) и изменении коэффициента теплопроводности пленки конденсата рабочего тела в широком диапазоне от 0,1 до 0,28 Вт/(м·К) выходная температура парожидкостного потока изменяется в среднем на 20 К. При низкой температуре наружного воздуха (кривая 3) и изменении

коэффициента теплопроводности пленки конденсата в том же диапазоне происходит уменьшение выходной температуры рабочего потока на величину около 25 К. Приведенные зависимости иллюстрируют, что выбранный заводом-изготовителем теплоноситель в качестве рабочей жидкости обеспечивает необходимые (табл. 3.1.1) выходные параметры парожидкостного потока из конденсаторной установки. В случае же применения альтернативного теплоносителя (соответствующий анализ выполнен в п. 4.3) в качестве рабочей жидкости потребуется детальное изучение его теплофизических свойств, так как рабочие температуры жидкости могут потребовать внесения конструктивных изменений как в конденсаторную установку, так и в другие узлы источника энергоснабжения.

Рис. 4.1.5 иллюстрирует зависимости выходной температуры рабочего тела от начальной скорости его течения внутри трубок конденсаторной установки при различных температурах наружного воздуха.

Анализ рис. 4.1.5 показывает, что в зависимости от значения температуры наружного воздуха при увеличении начальной скорости течения рабочего тела внутри трубок конденсаторной установки от 0,01 до 0,1 м/с, выходная температура парожидкостного потока увеличивается в среднем на 15-20 К. При дальнейшем повышении начальной скорости течения выходная температура рабочего потока из конденсаторной установки увеличивается значительно (рис. 4.1.5).

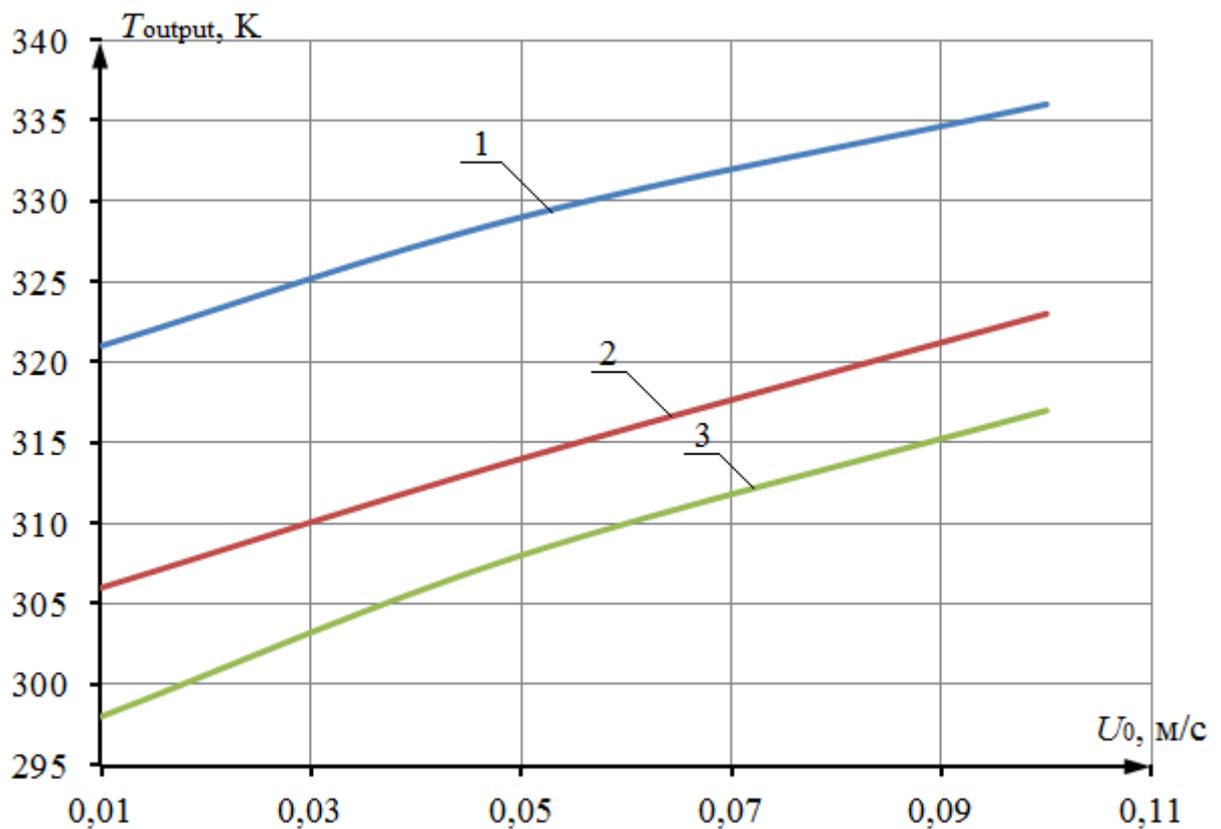


Рисунок 4.1.5. Зависимости выходной температуры рабочего потока T_{output} от начальной скорости его течения в трубках конденсаторной установки U_0 :

$$1 - T_{\text{out}}=303 \text{ К}; 2 - T_{\text{out}}=273 \text{ К}; 3 - T_{\text{out}}=253 \text{ К}$$

Полученные зависимости (рис. 4.1.5) показывают, что при минимальных скоростях теплоносителя обеспечиваются наиболее эффективные условия процесса конденсации. Этот эффект объясняется тем, что при увеличении скорости течения рабочего вещества в трубках конденсаторной установки конденсат не успевает охладиться.

Для приведенных на рис. 4.1.3–4.1.5 зависимостей получены аппроксимационные выражения (методом наименьших квадратов):

$$T_{\text{output}} = 1 \cdot 10^{-6} P^2 + 0,0056 P + 326,51 \text{ при } T_{\text{out}}=303 \text{ К и } 1000 < P < 4000 \text{ Вт};$$

$$T_{\text{output}} = 8 \cdot 10^{-7} P^2 + 0,0076 P + 307,75 \text{ при } T_{\text{out}}=273 \text{ К и } 1000 < P < 4000 \text{ Вт};$$

$$T_{\text{output}} = 8 \cdot 10^{-7} P^2 + 0,0055 P + 299,75 \text{ при } T_{\text{out}}=253 \text{ К и } 1000 < P < 4000 \text{ Вт};$$

$$T_{\text{output}} = -2343,7 \lambda_2^3 + 859,37 \lambda_2^2 - 153,75 \lambda_2 + 346,12 \text{ при } T_{\text{out}}=303 \text{ К и } 0,1 < \lambda_2 < 0,28 \text{ Вт/(мК)};$$

$$T_{\text{output}} = -3645,8\lambda_2^3 + 1406,2\lambda_2^2 - 226,67\lambda_2 + 336,25 \quad \text{при } T_{\text{out}}=273 \text{ К и } 0,1 < \lambda_2 < 0,28 \text{ Вт/(мК)};$$

$$T_{\text{output}} = -4947,9\lambda_2^3 + 1953,1\lambda_2^2 - 299,58\lambda_2 + 333,38 \quad \text{при } T_{\text{out}}=253 \text{ К и } 0,1 < \lambda_2 < 0,28 \text{ Вт/(мК)};$$

$$T_{\text{output}} = -666,67U_0^2 + 240,01U_0 + 318,67 \quad \text{при } T_{\text{out}}=303 \text{ К и } 0,01 < U_0 < 0,1 \text{ м/с};$$

$$T_{\text{output}} = -222,22U_0^2 + 213,33U_0 + 303,89 \quad \text{при } T_{\text{out}}=273 \text{ К и } 0,01 < U_0 < 0,1 \text{ м/с};$$

$$T_{\text{output}} = -777,78U_0^2 + 296,67U_0 + 295,11 \quad \text{при } T_{\text{out}}=253 \text{ К и } 0,01 < U_0 < 0,1 \text{ м/с}.$$

Представленные аппроксимационные выражения позволяют вычислить значения основной интегральной характеристики процесса (температуры рабочего потока на выходе из конденсатора) при варьировании выделенных параметров (P , λ_2 , U_0) в типичных для практики использования конденсаторов рассматриваемых мини-ТЭС [81, 90] диапазонах.

4.2. Влияние условий охлаждения органического рабочего вещества на интегральные характеристики функционирования конденсаторной установки

Область решения задачи тепломассопереноса [117] при конденсации органического рабочего вещества представлена на рис. 4.1.1. Численное моделирование исследуемого процесса выполнено при допущениях, приведённых в п. 3.2.

Математическая модель, соответствующая сформулированной физической постановке задачи, аналогична представленной в п. 3.3.

Численное моделирование процессов тепломассопереноса в условиях интенсивных фазовых переходов выполнено при следующих значениях теплофизических характеристик взаимодействующих веществ [113–116]:

$$C_1=1300 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}, \rho_{\text{input}}=5,1 \text{ кг/м}^3, \lambda_1=0,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)};$$

$$C_2=1300 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}, \rho_2=1300 \text{ кг/м}^3, \lambda_2=0,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)};$$

$$C_3=460 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}, \rho_3=7700 \text{ кг/м}^3, \lambda_3=54 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)};$$

$$Q_c=311,7 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}, D_I=0,018 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Начальные распределения скоростей U_0 и V_0 принимались аналогичными п. 4.1.

Задачи численного исследования процесса конденсации состояли в определении влияния основных параметров внешней среды на интегральные характеристики фазового перехода органического вещества в конденсаторе мини-ТЭС: определении зависимостей выходной температуры рабочего потока T_{output} от температуры внешней среды T_{out} и коэффициента теплообмена с внешней средой α .

На рис. 4.2.1 приведены результаты численного исследования интегральных характеристик процесса конденсации в трубке в зависимости от различных значений температуры наружного воздуха T_{out} при изменении температуры рабочего потока на входе в трубку.

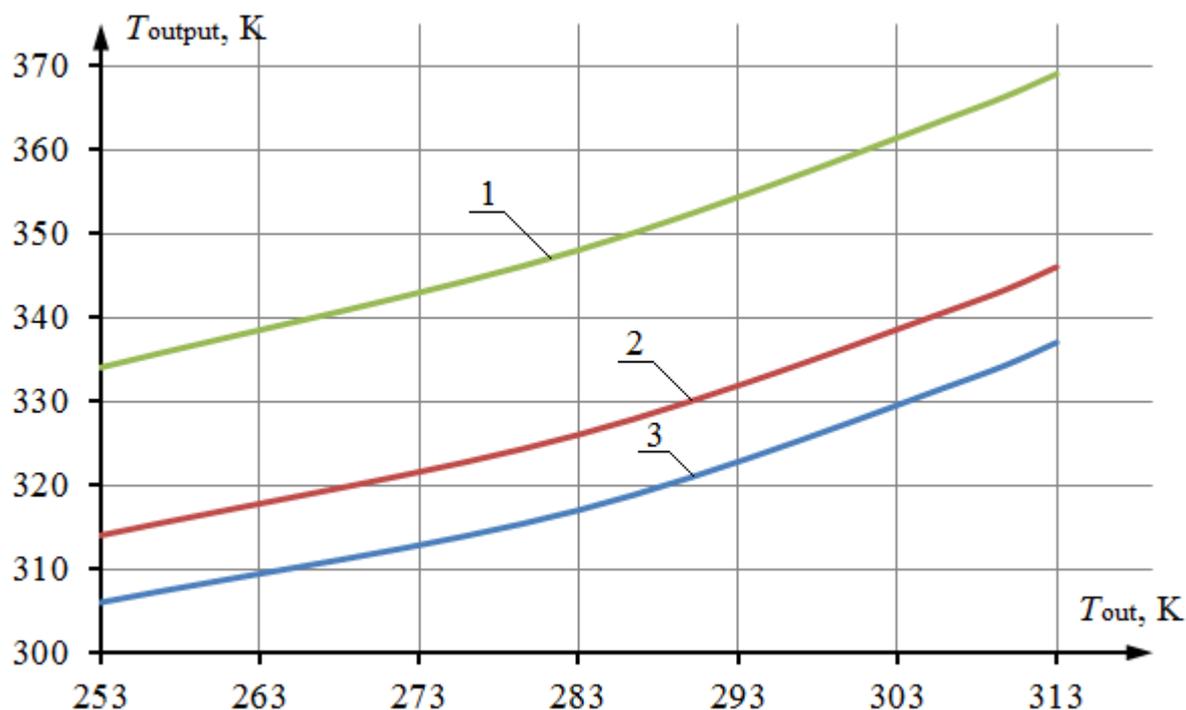


Рисунок 4.2.1. Зависимости выходной температуры рабочего потока T_{output} от температуры наружного воздуха T_{out} :

1 – $T_{\text{input}}=447$ К; 2 – $T_{\text{input}}=426$ К; 3 – $T_{\text{input}}=403$ К

Видно, что значение входной температуры рабочего вещества оказывает значительное влияние на исследуемый процесс (установленные зависимости хорошо согласуются с рис. 4.1.3).

Представленные на рис. 4.2.1 зависимости также подтверждают предположение об определяющей роли при интенсификации протекающих внутри трубок конденсатора процессов теплопереноса значения температуры наружного воздуха T_{out} .

В связи с тем, что рассматриваемые источники автономного энергоснабжения (мини-ТЭС) эксплуатируются в сложных климатических условиях, а работа конденсаторной установки напрямую зависит от температуры наружного воздуха, выбор эффективного режима работы конденсаторной установки является одной из основных задач обеспечения бесперебойного энергоснабжения удаленных объектов.

На рис. 4.2.2 приведены зависимости выходной температуры рабочего потока от температуры внешней среды при различных значениях коэффициента теплообмена α_a между внешней поверхностью трубки конденсатора и окружающим воздухом.

Показано, что при увеличении коэффициента теплоотдачи α_a температура пара на выходе из трубки конденсаторной установки при одинаковой температуре окружающей среды снижается достаточно умеренно. Это свидетельствует об относительно невысокой эффективности применения в качестве средства для дополнительной интенсификации процесса конденсации обдува трубок воздушным вентилятором (такой способ сейчас широко используется на мини-ТЭС [90], эксплуатируемых на удаленных линейных объектах газотранспортной системы России) и подтверждает заключение о решающем значении градиента температур для рассматриваемых процессов теплопереноса.

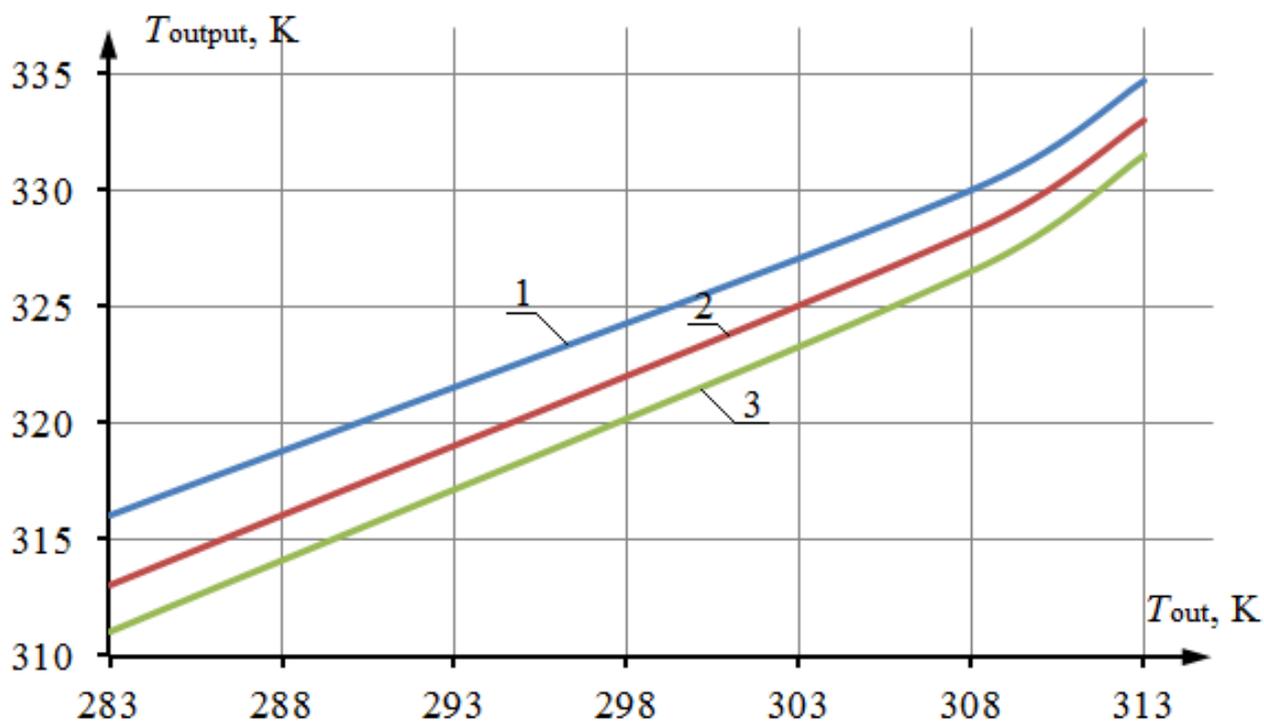


Рисунок 4.2.2. Зависимости выходной температуры рабочего потока T_{output} от температуры наружного воздуха T_{out} при воздушном охлаждении:

$$1 - \alpha_a = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); 2 - \alpha_a = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); 3 - \alpha_a = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

В качестве одного из методов повышения интенсивности теплопередачи от протекающего внутри канала теплоносителя является изменение конструкции оребрения [96] трубок конденсаторной установки мини-ТЭС. Также снижение выходной температуры рабочего потока возможно путем создания турбулентного режима внутри трубок конденсаторной установки с помощью напайки волнистых поверхностей или шипов [96]. Это позволяет значительно увеличить коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности канала. Однако при этом внутри трубок возрастёт гидравлическое сопротивление, что является крайне нежелательным в условиях движения рабочей жидкости в конденсаторной установке (особенно для органических теплоносителей).

К распространённым методам повышения интенсивности охлаждения различных теплоотдающих поверхностей также относится применение в качестве охлаждающей среды воды, омывающей поверхность теплообмена

[96]. Как правило, при использовании водяного охлаждения различных жидкостей и газов, протекающих внутри каналов, значения коэффициентов теплообмена между внешней поверхностью канала и омывающей его водой достигают нескольких сотен $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Поэтому представляется целесообразным анализ возможных режимов работы конденсатора мини-ТЭС в случае преобразования его конструкции с заменой воздушного охлаждения на водяное.

На рис. 4.2.3 приведены зависимости выходной температуры рабочего потока от температуры окружающей среды при значениях коэффициента теплообмена α_w , соответствующих водяному охлаждению.

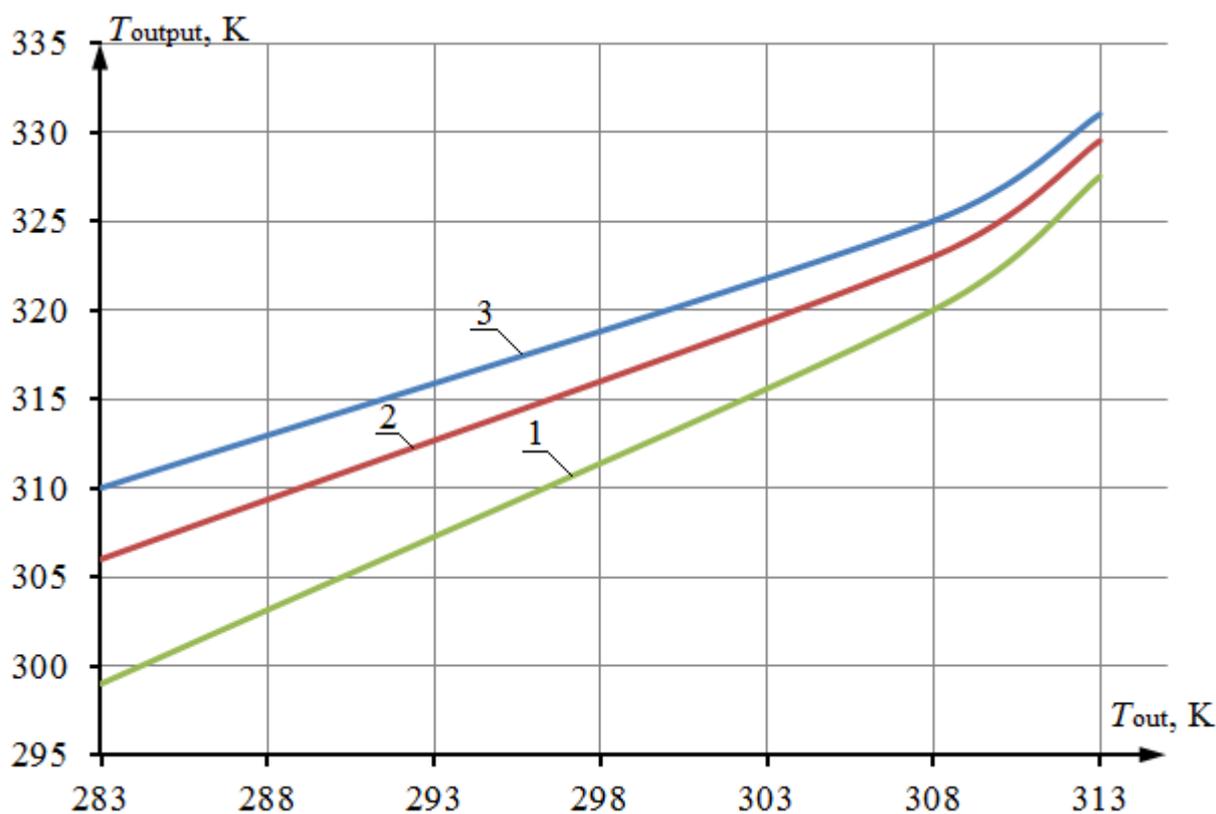


Рисунок 4.2.3. Зависимости выходной температуры рабочего потока T_{output} от температуры окружающей среды T_{out} при водяном охлаждении:

$$1 - \alpha_w = 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}); 2 - \alpha_w = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}); 3 - \alpha_w = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$$

Результаты численного моделирования, приведённые на рис. 4.2.3, свидетельствуют об обеспечении более эффективных условий конденсации и охлаждения рабочего потока по сравнению с конструкцией,

предусматривающей воздушное охлаждение (значения выходных температур T_{output} отличаются в среднем до 5 К при соответствующих температурах окружающей среды T_{out}).

Необходимо учитывать, что для обеспечения водяного охлаждения трубок конденсатора рассматриваемой мини-ТЭС (рис. 3.1) требуется значительное преобразование конструкции. Кроме того, наличие принудительного водяного охлаждения сопровождается затратами энергии на перекачку охлаждающей среды, что в условиях удалённого функционирования источника энергоснабжения, а также его небольшой установленной электрической мощности может быть определяющим аргументом.

Представленные на рис. 4.2.3 зависимости хорошо согласуются с результатами, приведенными на рис. 4.2.2, и также иллюстрируют определяющее влияние на исследуемые процессы теплопереноса и конденсации значения температуры окружающей среды.

Для приведенных на рис. 4.2.1 – 4.2.3 зависимостей получены аппроксимационные выражения:

$$T_{\text{output}} = 0,0039T_{\text{out}}^2 - 1,6177T_{\text{out}} + 494,37 \text{ при } T_{\text{input}}=447 \text{ К и } 253 < T_{\text{out}} < 313 \text{ К;}$$

$$T_{\text{output}} = 0,0044T_{\text{out}}^2 - 1,9814T_{\text{out}} + 531,01 \text{ при } T_{\text{input}}=426 \text{ К и } 253 < T_{\text{out}} < 313 \text{ К;}$$

$$T_{\text{output}} = 0,005T_{\text{out}}^2 - 2,313T_{\text{out}} + 571,23 \text{ при } T_{\text{input}}=403 \text{ К и } 253 < T_{\text{out}} < 313 \text{ К.}$$

$$T_{\text{output}} = 0,0127T_{\text{out}}^2 - 6,9261T_{\text{out}} + 1261,6 \text{ при } \alpha_a=10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К) и } 283 < T_{\text{out}} < 313 \text{ К;}$$

$$T_{\text{output}} = 0,0117T_{\text{out}}^2 - 6,3264T_{\text{out}} + 1163,7 \text{ при } \alpha_a=20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К) и } 283 < T_{\text{out}} < 313 \text{ К;}$$

$$T_{\text{output}} = 0,0127T_{\text{out}}^2 - 6,866T_{\text{out}} + 1239,6 \text{ при } \alpha_a=30 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К) и } 283 < T_{\text{out}} < 313 \text{ К;}$$

$$T_{\text{output}} = 0,0211T_{\text{out}}^2 - 11,221T_{\text{out}} + 1883,5 \text{ при } \alpha_w=100 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К) и } 283 < T_{\text{out}} < 313 \text{ К;}$$

$$T_{\text{output}} = 0,0207T_{\text{out}}^2 - 11,534T_{\text{out}} + 1914,9 \text{ при } \alpha_w=200 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К) и } 283 < T_{\text{out}} < 313 \text{ К;}$$

$$T_{\text{output}} = 0,0221T_{\text{out}}^2 - 12,162T_{\text{out}} + 1978,9 \text{ при } \alpha_w=300 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К) и } 283 < T_{\text{out}} < 313 \text{ К.}$$

Представленные аппроксимационные выражения позволяют определить значения температуры рабочего потока на выходе из трубок конденсатора мини-ТЭС при различных условиях теплообмена с воздушной и водяной системой охлаждения.

4.3. Анализ влияния теплофизических характеристик органических рабочих веществ на интегральные характеристики функционирования конденсаторной установки

Физическая и математическая постановки задачи, схема численного решения, а также допущения, при которых выполнены теоретические исследования, аналогичны приведенным в п. 3.2 и 3.3.

Представляет интерес анализ влияния теплофизических свойств органического рабочего вещества на интенсивность протекающих внутри трубок процессов конденсации и охлаждения. В связи с этим проведены численные исследования процессов тепломассопереноса в конденсаторной установке с использованием проектного и альтернативного для рассматриваемого источника энергоснабжения рабочего вещества.

Одной из главных особенностей работы рассматриваемой мини-ТЭС является использование сконденсировавшейся проектной рабочей жидкости – дихлорбензола – для смазки подшипников скольжения, на которых установлен вал турбогенератора. Поэтому для сравнительного анализа интегральных характеристик работы источника энергоснабжения в качестве альтернативы дихлорбензолу целесообразно выбрать такой органический теплоноситель, который обладал бы хорошими смазывающими свойствами, высокой предельной температурой использования и химической инертностью. Довольно часто при обсуждении аналогов дихлорбензола отмечается [81, 90] полидиэтилсилоксановая жидкость ПЭС–5, которая имеет наиболее близкие свойства [118].

Численное моделирование процессов тепломассопереноса в условиях интенсивных фазовых переходов выполнено при следующих значениях теплофизических характеристик взаимодействующих веществ [113–116, 118].

Рабочее вещество – дихлорбензол:

$$C_1=1300 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \rho_{\text{input}}=5,1 \text{ кг}/\text{м}^3, \lambda_1=0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$C_2=1300 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \rho_2=1300\text{кг}/\text{м}^3, \lambda_2=0,12 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$Q_c=311,7\cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}, D_l=0,018 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Рабочее вещество – полиэтилсилоксановая жидкость ПЭС–5:

$$C_1=3250 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \rho_{\text{input}}=58\text{кг}/\text{м}^3, \lambda_1=0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$C_2=1940 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \rho_2=895\text{кг}/\text{м}^3, \lambda_2=0,13 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$Q_c=200\cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}, D_l=0,011 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Для материала стенки трубки конденсатора и воздуха:

$$C_3=460 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \rho_3=7700 \text{ кг}/\text{м}^3, \lambda_3=54 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$C_4=1006 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \rho_4=1,2\text{кг}/\text{м}^3, \lambda_4=0,026 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

Начальные распределения скоростей U_0 и V_0 принимались аналогичными п. 4.1.

Задачи численного исследования процесса конденсации состояли в сравнении интегральных характеристик тепломассопереноса в трубке конденсатора при использовании проектной рабочей жидкости (дихлорбензола) и альтернативного теплоносителя (ПЭС–5).

На рис. 4.3.1 приведены температурное поле и изотермы в рассматриваемой системе при использовании в качестве теплоносителя ПЭС–5. Аналогичные распределения T для дихлорбензола приведены на рис. 4.1.2.

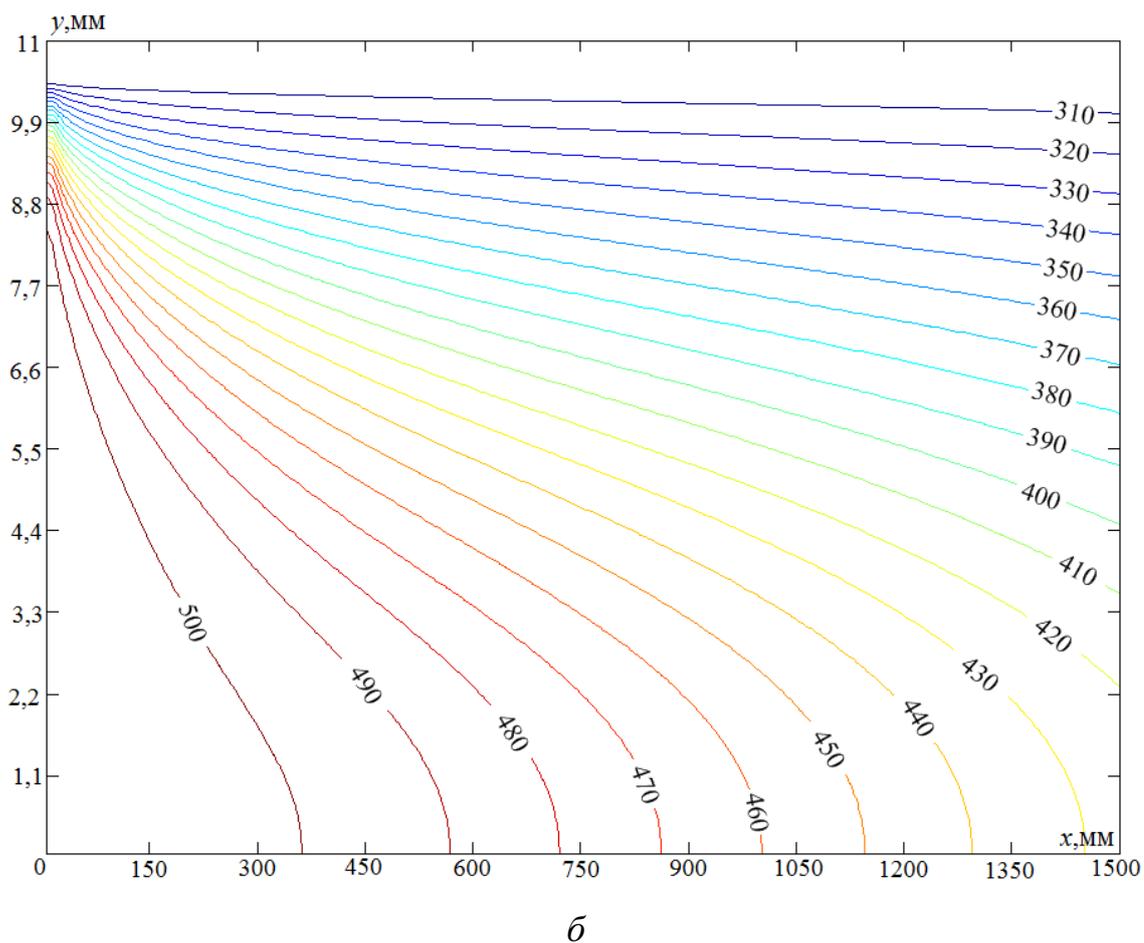
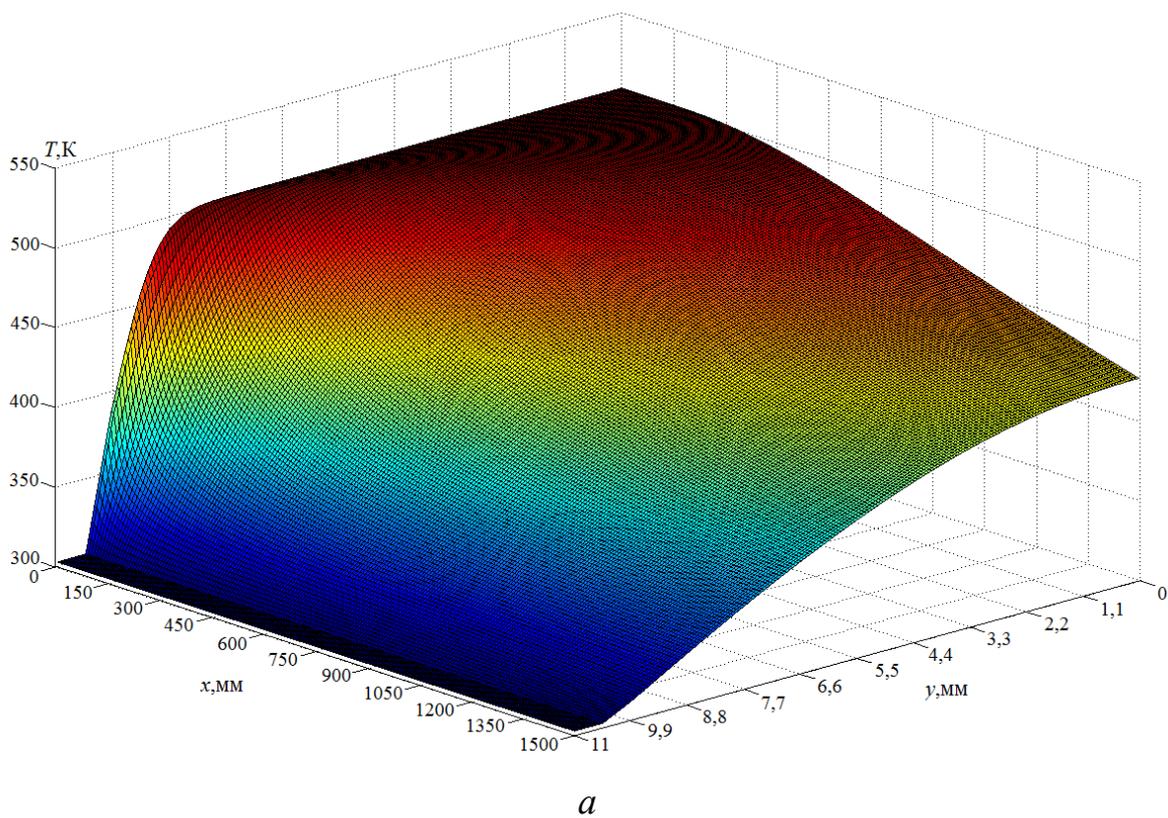


Рис. 4.3.1. Температурное поле (*a*) и изотермы (*б*) для рабочего канала с ПЭС-5 в момент времени $\tau=15$ с при $T_{\text{input}}=503$ К и $T_{\text{out}}=303$ К

Сравнивая рисунки 4.3.1 и 4.1.2 можно сделать вывод о более интенсивном снижении температуры теплоносителя в случае использования ПЭС–5. Такой эффект, вероятно, объясняется менее значительным выделением энергии при конденсации этого рабочего вещества вследствие более низкого (относительно дихлорбензола) значения скрытой энергии фазового перехода Q_c [118].

На рис. 4.3.2 представлены результаты численного решения поставленной задачи.

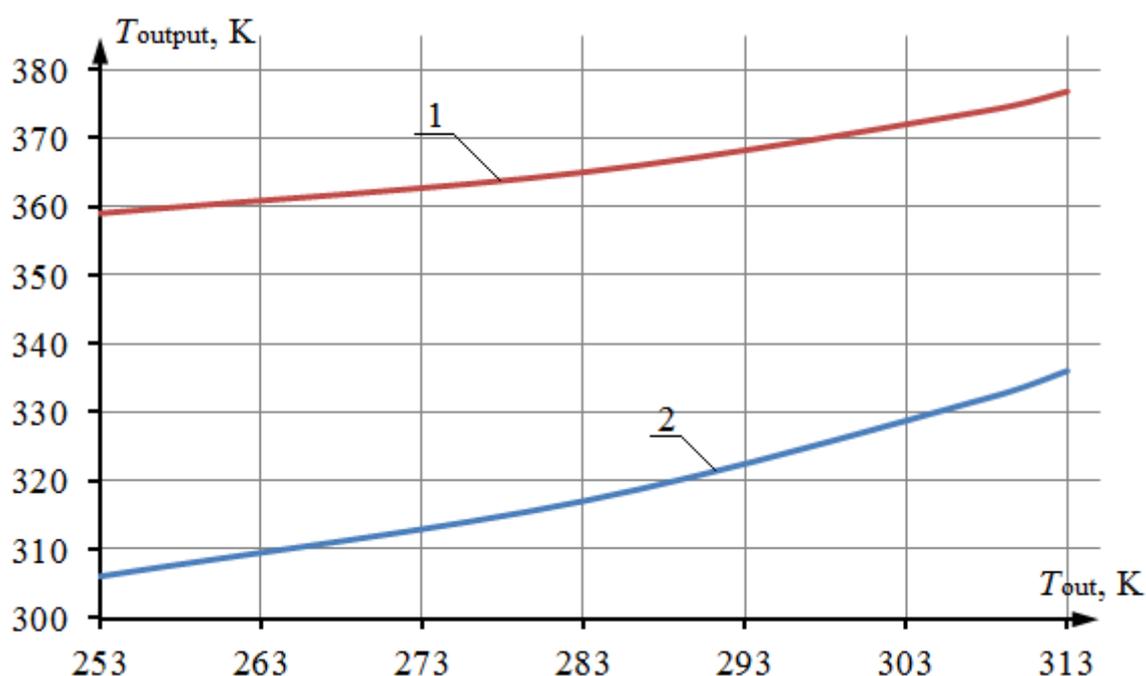


Рис. 4.3.2. Зависимости температуры рабочего потока на выходе из конденсатора T_{output} от температуры окружающей среды T_{out} :

1 – ПЭС–5; 2 – дихлорбензол

Для приведенных на рис. 4.3.2 зависимостей сформулированы следующие аппроксимационные выражения:

$T_{output} = 0,0032T_{out}^2 - 1,5241T_{out} + 539,09$ при $253 < T_{out} < 313$ К и рабочем веществе «ПЭС–5»;

$T_{output} = 0,0044T_{out}^2 - 2,0135T_{out} + 531,44$ при $253 < T_{out} < 313$ К и рабочем веществе «дихлорбензол».

Представленные на рис. 4.3.2 зависимости позволяют сделать вывод о более масштабном влиянии на процессы тепломассопереноса, протекающие в трубке конденсатора энергоустановки (мини–ТЭС), значения температуры внешней среды в случае применения в качестве теплоносителя дихлорбензола (кривая 2). Выходная температура рабочего потока дихлорбензола изменяется на 30 К при варьировании температуры окружающего конденсатор воздуха в диапазоне $T_3=253\div 313$ К.

При использовании в замкнутом термодинамическом цикле мини–ТЭС полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС–5 влияние температуры наружного воздуха на процесс конденсации менее значительно (кривая 1). Выходная температура рабочего потока изменяется на 12 К при изменении температуры внешней среды в том же диапазоне. При этом для диапазона температур наружного воздуха $T_3=293\div 313$ К более благоприятные условия конденсации обеспечиваются в случае использования ПЭС–5 (разность между значениями температуры кипения и выходной температуры рабочего потока составляет около 143 К, в то время как для дихлорбензола эта разность составляет менее 120 К).

Полученные результаты численного моделирования можно объяснить тем, что кремнийорганический теплоноситель ПЭС–5 имеет значительно более высокую (по сравнению с дихлорбензолом) температуру конденсации ($T_{\text{ПЭС-5}} \approx 520$ К), и даже в условиях высокой температуры окружающей среды между стенкой трубки конденсатора и омывающим её снаружи воздухом возникает достаточно большой градиент температур. В условиях же более низких температур наружного воздуха применение дихлорбензола эффективнее в связи с тем, что это вещество характеризуется большей энергией фазового перехода.

Следует также отметить, что применение в качестве рабочего вещества в органическом цикле Ренкина энергоустановки полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС–5 потребовало бы осуществления всех этапов цикла при значительно более высоком температурном режиме (рис. 4.3.1), что

отрицательно сказывается на режимах работы основных агрегатов мини-ТЭС, в частности, подшипников скольжения турбогенератора [81, 90], и может стать причиной снижения надёжности и ресурсоэффективности источника энергии. Таким образом, можно утверждать, что применение в рассматриваемом термодинамическом цикле проектного рабочего вещества – дихлорбензола является наиболее целесообразным.

4.4. Оценка взаимного влияния нескольких трубок конденсаторной установки на параметры рабочего потока

Моделирование процесса конденсации выполнено для системы, представленной на рис. 4.4.1.

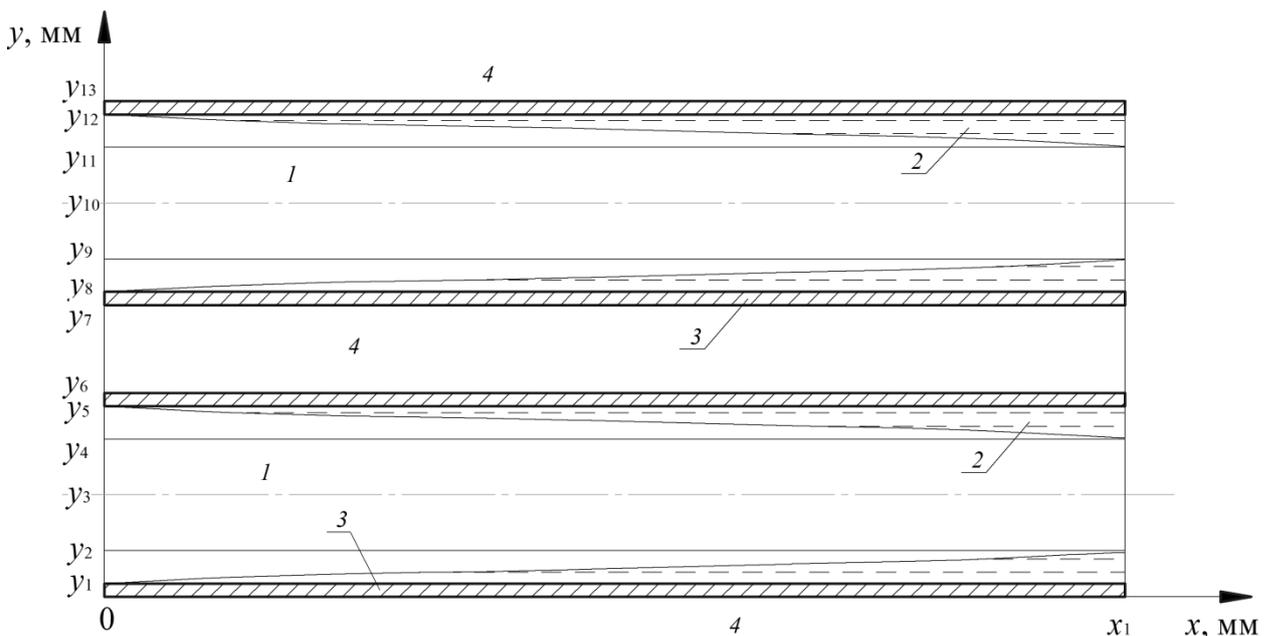


Рисунок 4.4.1. Схема области решения задачи тепломассопереноса:

1 – пар; 2 – конденсат; 3 – стенка трубки конденсатора; 4 – окружающий воздух

Задачи численного исследования процесса конденсации состояли в определении масштабов влияния взаимного расположения трубок воздушного конденсатора на интегральные характеристики процесса конденсации органического вещества.

Физическая постановка задачи аналогична представленной в п. 3.2.

В качестве размеров области решения задачи приняты следующие: $H_x=1500$ мм, $H_y=50$ мм (что соответствует сумме внешних поперечных размеров двух трубок конденсатора мини-ТЭС и расстояния между ними). Задача решена в декартовой системе координат.

Нестационарные дифференциальные уравнения, описывающие процесс конденсации рабочего тела в трубках конденсаторной установки (рис. 4.4.1) и соответствующие сформулированной физической постановке задачи, аналогичны системе (3.3.1)–(3.3.16) с учетом воздушного зазора между двумя трубками.

Численное моделирование процессов тепломассопереноса в условиях интенсивных фазовых переходов выполнено при следующих значениях теплофизических характеристик взаимодействующих веществ [113–116]:

$$C_1=1300 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \rho_{\text{input}}=5,1 \text{ кг}/\text{м}^3, \lambda_1=0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$C_2=1300 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \rho_2=1300 \text{ кг}/\text{м}^3, \lambda_2=0,12 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$C_3=460 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \rho_3=7700 \text{ кг}/\text{м}^3, \lambda_3=54 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$C_4=1006 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \rho_4=1,2 \text{ кг}/\text{м}^3, \lambda_4=0,026 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$Q_c=311,7\cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}, D_l=0,018 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Начальные распределения скоростей U_0 и V_0 принимались аналогичными п. 4.1.

На рис. 4.4.2 представлены типичные изотермы и температурное поле для системы с двумя трубками конденсатора при расстоянии между ними $L=6$ мм.

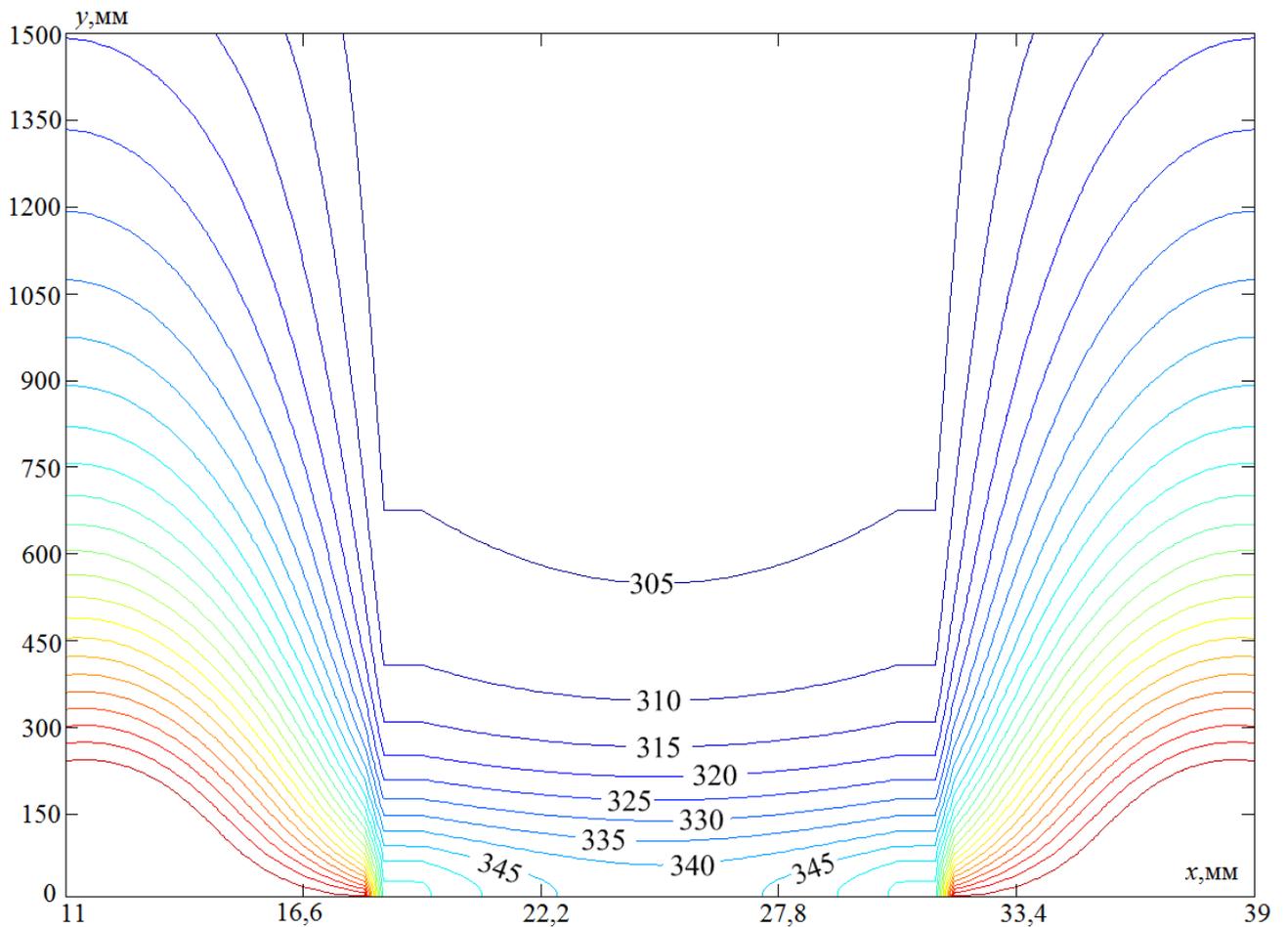


Рис. 4.4.2. Изотермы рассматриваемой системы при $T_{\text{out}}=303$ К, $L=6$ мм

Показано, что температура воздуха на оси симметрии между двумя трубками изменяется от 305 до 345 К при температуре наружного воздуха $T_{\text{out}}=303$ К. Такой эффект обусловлен взаимным влиянием оттока тепла от расположенных рядом трубок на интенсивность теплоотдачи в межтрубном пространстве.

Повышение температуры воздуха между трубками значительно влияет на процесс конденсации рабочего вещества. Температура рабочего потока на выходе из трубок на рис. 4.4.2 выше относительно приведенных на рис. 4.1.2). Это обусловлено тем, что основным фактором, влияющим на интенсивность тепломассопереноса в рассматриваемой системе (рис. 4.4.1), является градиент температур между потоком рабочего вещества внутри трубок конденсатора и внешней средой, омывающей трубки конденсатора (п. 4.1–4.3).

Последствием ухудшения условий теплообмена может быть рост температуры на выходе из конденсаторной установки сверх нормативной, установленной заводом-изготовителем. Это, в свою очередь, приводит к аварийному останову источника энергоснабжения и прекращению подачи электроэнергии потребителям («предельно высокая температура рабочего потока в конденсаторе» является причиной порядка 20 % общего количества технических происшествий (рис. 2.2.1) при эксплуатации автономных энергоустановок с замкнутым циклом пара – мини-ТЭС).

На рис. 4.4.3 приведены результаты численного моделирования процесса конденсации в трубках на разном удалении друг от друга.

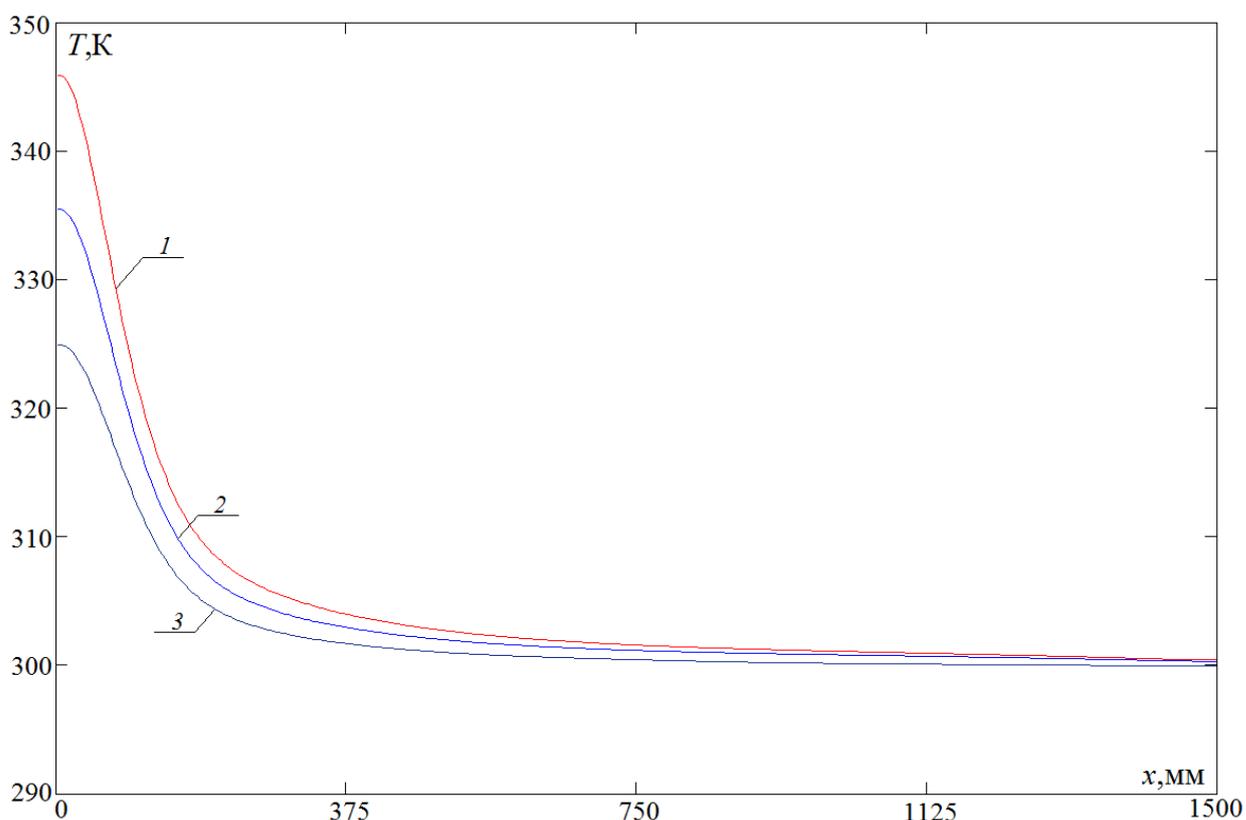


Рис. 4.4.3. Распределения температуры внешней среды в межтрубном пространстве (на оси симметрии) при $T_{\text{out}}=303 \text{ К}$:

1 – $L=6 \text{ мм}$; 2 – $L=9 \text{ мм}$; 3 – $L=12 \text{ мм}$

Как и можно было предположить, меньшее значение температуры воздуха между трубками конденсатора соответствует большему расстоянию

между ними ($L=12$ мм). При этом следует отметить, что увеличение расстояния между каналами конденсатора на каждые 3 мм соответствует снижению температуры воздуха в межтрубном пространстве в среднем на 5 К (рис. 4.4.3). Таким образом, можно утверждать, что процесс конденсации пара будет протекать наиболее интенсивно при удалении трубок конденсатора друг от друга на расстояние не менее половины их внутреннего диаметра.

Необходимо отметить, что в реальных условиях эксплуатации конструкция конденсатора типичной мини-ТЭС, работающей на базе органического цикла Ренкина, предусматривает два расположенных друг над другом ряда из 16 трубок (рис. 3.1.1). Из этого следует, что на практике снижение интенсивности теплоотдачи от конденсирующегося дихлорбензола более значительно, поскольку каждая трубка (кроме крайних в ряду) нагревается за счет притока тепла от трех соседних трубок. Следовательно, целесообразно увеличение шага между трубками конденсатора до $L=18$ мм.

Учитывая ограничения по размерам конденсаторных установок [90], можно рекомендовать минимально возможные расстояния между трубками. В частности, для рассматриваемых установок [81, 90], как показали численные исследования (п. 4.4), удаления трубок относительно соседних должны быть не меньше 6 мм.

4.5. Рекомендации по использованию полученных результатов

При обобщении теоретических следствий полученных при проведении диссертационных исследований можно выделить несколько рекомендаций по использованию полученных результатов:

- ✓ приведенные в четвертой главе рукописи зависимости интегральных характеристик процесса конденсации (в частности, выходной температуры рабочего потока) от внешних (температура наружного воздуха, условия теплообмена, конструктивные особенности

конденсатора, нагрузка) и внутренних (температура, давление и скорость движения рабочего тела, его теплофизические и термокинетические параметры) факторов позволяют объяснить причины соответствующих технических происшествий (в частности, в разные времена года, суток и при разных климатических условиях эксплуатации);

- ✓ сформулированные в третьей главе диссертации физические и математические модели тепломассопереноса с фазовыми переходами можно использовать в качестве прогностических при выборе параметров работы конденсаторной установки мини-ТЭС (ее непосредственной адаптации) при различных условиях эксплуатации. Это позволит существенно снизить число технических происшествий (а в некоторых случаях и полностью исключить), связанных с работой конденсаторных установок мини-ТЭС на удаленных линейных объектах важнейших магистральных газопроводов России. Как следствие, можно повысить интегральные характеристики надежности и рабочего ресурса мини-ТЭС. Для оценки влияния основных факторов и процессов на интегральные характеристики конденсации можно использовать приведенные в четвертой главе рукописи аппроксимационные выражения;
- ✓ представленные в третьей и четвертой главах рукописи физические и математические модели целесообразно в дальнейшем развивать в нескольких направлениях, например, перехода к пространственным постановкам и цилиндрическим системам координат, учета различных механизмов тепло – и массопереноса для фундаментального анализа особенностей и соответствующих закономерностей, а также разработке максимально упрощенных схем и приближений;
- ✓ результаты численных исследований можно использовать для анализа интегральных характеристик надежности и рабочего ресурса широкой группы мини-ТЭС, работающих в режиме когенерации (не только используемых на газо- и нефтепроводах России). При этом возможно использование разработанных моделей тепломассопереноса в

конденсаторах мини–ТЭС при различных условиях теплообмена, конструкциях, различных органических и неорганических теплоносителях;

- ✓ сформулированный в диссертации новый подход к выявлению причин технических происшествий в работе конденсаторных установок мини–ТЭС, основанный на математическом моделировании физико-химических процессов, превращений и фазовых переходов, можно использовать при объяснении других технических происшествий на мини–ТЭС (рис. 2.2.1), особенно обрыва пламени горелочного устройства. 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 для измерения этих параметров в нескольких контрольных точках рабочего тракта;
- ✓ вычисленные значения интегральных характеристик надежности и рабочего ресурса мини–ТЭС (интенсивность и поток отказов, а также время наработки) можно использовать в качестве номинальных для сравнения с другими альтернативными источниками автономного энергоснабжения.

Выводы по четвертой главе

1. Установлено, что основным параметром, существенно влияющим на выходную температуру рабочего потока из трубки конденсаторной установки T_{output} , является температура окружающей среды T_{out} .

2. При высоких значениях температуры окружающей среды (в летнее время) надёжность работы источника энергоснабжения может быть низкой вследствие невысокой эффективности способа дополнительной интенсификации теплообмена за счёт применения для обдува внешних

поверхностей трубок конденсатора вентилятора. Существенно большей эффективности охлаждения можно достичь при применении систем водяного охлаждения.

3. Сравнительный анализ эффективности применения в замкнутом цикле пара рассматриваемой энергоустановки проектного и альтернативного рабочих веществ показал целесообразность использования в качестве органического рабочего тела для источника энергоснабжения данной конструкции дихлорбензола.

4. Установлено, что расположенные рядом трубки конденсатора могут значительно ухудшить условия конденсации внутри каналов, поскольку температура воздуха в межтрубном пространстве существенно повышается за счёт теплоотдачи от поверхности трубок конденсатора. На основании полученных при численном моделировании результатов сделано заключение об оптимальном расстоянии между трубками конденсатора рассматриваемой мини-ТЭС до $L=18$ мм.

5. Показано, что результаты численных исследований можно использовать как при анализе причин технических происшествий, так и при прогностическом выборе параметров и режимов работы конденсатора мини-ТЭС с целью повышения их надежности. При этом возможно дальнейшее развитие моделей тепломассопереноса на широкий ряд различных по используемым теплоносителям, конструктивным особенностям и режимам эксплуатации мини-ТЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые проведены сбор и обработка информации по техническим происшествиям на мини–ТЭС удаленных технологических объектов газотранспортной системы России. Выполнен анализ наиболее типичных происшествий.
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. Выявлены 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 реализуемому в конденсаторах мини–ТЭС при критических условиях их работы.
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 и 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. Получены акт внедрения этих моделей на предприятии ООО «Газпром трансгаз Томск» и три свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

10. Разработаны рекомендации по повышению показателей надежности и ресурсоэффективности типичных мини-ТЭС, работающих в режиме когенерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года // Утверждена распоряжением Правительства РФ от 28 августа 2003 г. № 1234.
2. Батенин, В.М. О некоторых нетрадиционных подходах к разработке стратегии развития энергетики России / В.М. Батенин // Теплоэнергетика. – 2000. – № 10. – С. 5–13.
3. Дьяков, А.Ф. Энергетика России и мира в 21-м веке / А.Ф. Дьяков // Энергетик. – 2000. – № 11. – С. 2–9.
4. Кононенко, П.И. Малая энергетика – первооснова больших свершений / П.И. Кононенко, В.Г. Михайлуц, А.Е. Беззубцев-Кондаков // Энергетик. – 2007. – № 3. – С. 43–44.
5. Правила технической эксплуатации энергоустановок потребителей // Утверждены Приказом Минэнерго РФ от 13.01.2003 № 6. – 304 с.
6. Правила технической эксплуатации электростанций собственных нужд объектов ОАО «Газпром» ВРД 39-01.10-071-2003 // ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – ВНИИГАЗ». – Москва. – 2003. – 50 с.
7. Регламент технического обслуживания и ремонта объектов ОАО «Газпром» // Утверждён приказом ОАО «Газпром» от 10.10.2008 г. № 251 – С. 32.
8. Ливинский, А.П. Пути решения проблем автономного энергоснабжения потребителей удалённых регионов России / А.П. Ливинский, И.Я. Редько // Энергетик. – 2010. – № 4. – С. 22–26.
9. Марченко, О.В. Исследование долгосрочных перспектив использования возобновляемых источников энергии для децентрализованного энергоснабжения / О. В. Марченко, С. В. Соломин // Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2006 . – 62 с.
10. Высокоморный, В.С. Реализация инновационных технологий энергообеспечения автономных объектов газотранспортной системы /

- В.С. Высокоморный, Б.А. Сярг // Новые технологии газовой, нефтяной промышленности, энергетики и связи: Сборник трудов XX международного технологического конгресса. – Москва: Академия технологических наук РФ. – 2012. – С. 164–168.
11. Высокоморный, В.С. Повышение надежности энергообеспечения удаленных объектов транспорта нефти и газа путем использования автономных источников энергоснабжения / В.С. Высокоморный // Энергетическое обследование как первый этап реализации концепции энергосбережения: Материалы международной конференции. – Томск: Томский политехнический университет. – 2012. – С. 190–192.
 12. Гусаров, В.А. Когенерационная система энергоснабжения сельского дома/ В.А. Гусаров, В.В. Заддэ // Вестник ВИЭСХ. – 2006. – Т. 1. – № 2. – С. 25–30.
 13. Пивнюк, В.А. Инновационные энергетические технологии преобразования энергии и распределенной когенерации - основа энергетики будущего / В.А. Пивнюк // Интеграл. – 2008. – № 3. – С. 42–43.
 14. Абсорбционные холодильные машины компании Dunham-BushInternational // Холодильная техника. – 2000. – №11. – С. 23–25.
 15. Абсорбционные холодильные машины фирмы "Trane" в системах кондиционирования воздуха // [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2227876>.
 16. Алейникова, А.А. Абсорбционные холодильные машины в системе тригенерации / А.А. Алейников // Энергия и Менеджмент. – 2008. – №4. – С. 55–57.
 17. Андриющенко, А.И. Основы технической термодинамики реальных процессов / А.И. Андриющенко // – М.: Высшая школа. – 1975. – С. 264.
 18. Надежность в технике. Термины и определения: ГОСТ 27.002.2009. – Москва. – 2011. – 28 с.

19. Терентьев, А.Н. Надежность газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом / А.Н. Терентьев, З.С. Седых, В.Г. Дубинский. – Москва: Недра, 1979. – 207 с.
20. Отчет за 2010 г. о работе паротурбогенераторов на магистральном газопроводе «Камчатка». ОАО «Газпром». – 115 с.
21. Отчет за 2011 г. о работе паротурбогенераторов на магистральном газопроводе «Сахалин–2». ОАО «Газпром». – 134 с.
22. Отчет за 2012 г. о работе паротурбогенераторов на магистральном газопроводе «Камчатка». ОАО «Газпром». – 118 с.
23. Высокоморный В.С., Стрижак П.А. Акт внедрения научно-технической продукции ООО «Газпром трансгаз Томск». Программа расчета интегральных характеристик конденсаторной установки, работающей по органическому циклу Ренкина. № 12 от 30.08.2013.
24. Высокоморный В.С., Стрижак, П.А. Программа расчета интегральных характеристик конденсаторной установки, работающей по органическому циклу Ренкина // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619264. – Бюлл. прогр. № 2, 2013.
25. Высокоморный В.С., Стрижак, П.А. Программа расчета характеристик конденсаторной установки с принудительным водяным охлаждением, используемой на автономных источниках энергоснабжения // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619339. – Бюлл. прогр. № 2, 2013.
26. Высокоморный В.С., Стрижак, П.А. Программа расчета характеристик конденсации в узлах охлаждения различной конструкции // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619382. – Бюлл. прогр. № 2, 2013.
27. Фаворский, О.Н. Эффективные технологии производства электрической и тепловой энергии с использованием органического топлива / О.Н. Фаворский, А.И. Леонтьев, В.А. Федоров, О.О. Мильман // Теплоэнергетика. – 2003. – № 9. – С. 19–21.

28. Попель, О.С. Возобновляемые источники энергии: состояние и перспективы развития / О.С. Попель, В.Л. Туманов // Альтернативная энергетика и экология. – 2007. – № 2 (47). – С. 135–148.
29. Марченко, О.В. Повышение эффективности энергоснабжения децентрализованных потребителей с применением возобновляемых источников энергии и топливных элементов / О.В. Марченко, С.В. Соломин // Экология промышленного производства. – 2008.– № 1. – С. 86–90.
30. Трещалин, М.Ю. Перспективы применения нетрадиционных возобновляемых источников энергии / М.Ю. Трещалин, Н.А. Феоктистов, С.В. Денисов // Тезис доклада Международной НТК Наука-сервису. – Москва: МГУС. – 1999. – С. 130.
31. Осадчий, Г.Б. Альтернативная энергетика и энергетический кризис / Г.Б. Осадчий // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1995. – №1. – С. 18–19.
32. Алексеев, Б.А. Ветроэнергетика мира и ее проблемы / Б.А. Алексеев // Энергетика за рубежом. – 2007. – № 5. – С. 31–47.
33. Шейндлин, А.Е. Распределенная генерация тепловой и электрической энергии на основе возобновляемых источников с использованием алюминия в качестве промежуточного энергоносителя / А.Е. Шейндлин, А.З. Жук, Е.И. Школьников, А.В. Берш, Б.В. Клейменов, А.Б. Тарасенко // Теплоэнергетика. – 2010. – № 11. – С. 51–57.
34. Фатеев, Е.М. Ветродвиатели и ветроустановки / Е.М. Фатеев. – М.: Сельхозгиз. – 1948. – 400–415 с.
35. Иванов, А.В. Автономная ветроэнергетическая установка с индукционным нагревателем: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Казань, 2000. – 14 с.
36. Бобров, А.В. Электроснабжение северных населенных пунктов на основе ветродизельных комплексов: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Красноярск, 2010. – С. 4-8.

37. Денисов, С.В. Система автономного питания с ветрогенератором: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Москва, 2001. – С. 21–29.
38. Аполлонов, Ю.Е. Перспективы комплексного использования ветроэлектрических станций с другими энергоисточниками. / Ю.Е. Аполлонов // Энергетика. – 1997. – № 2. – С.32–34.
39. Корнильев Е.Н. Солнечная энергетическая установка. / Корнильев Е.Н. // [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2227876>.
40. Виноградов С.В. Гелиоустановка горячего водоснабжения и ее солнечный коллектор / Виноградов С.В. // [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2250422>.
41. Коровкин С.В. Солнечная энергетическая установка / Коровкин С.В. // [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2377440>.
42. Фокин, Г.А. Применение автономных химических и нетрадиционных источников электрической энергии для энергообеспечения линейных потребителей магистральных газопроводов и газораспределительных станций / Г.А. Фокин // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2009. – № 4–1(89). – С. 131–141.
43. Коровин, Н.В. Электрохимическая энергетика / Н.В. Коровин. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 264 с.
44. Аваков, В.Б., Зинин В.И. Подводным лодкам XXI века – совершенные энергоустановки / В.Б. Аваков, В.И. Зинин // Военный парад. – 1998. – № 5. – С. 26–28.
45. Аваков, В.Б. Автономные энергоустановки на основе высокотемпературных электрохимических генераторов для промышленных и коммунальных объектов / В.Б. Аваков, В.И. Зинин, И.К. Ландграф // Теплоэнергоэффективные технологии. – 1997. – № 4. – С. 25–29.

46. Аваков, В. Б. Пути разработки и перспективы создания экономичной экологически чистой энергетики на топливных элементах / В.Б. Аваков, В.И. Зинин, И.К. Ландграф // Российский химический журнал, т. XXX_vIII. – 1994. – № 3. – С. 55–60.
47. Саламов, А.А. Применение топливных элементов в энергетике / А.А. Саламов // Энергетик. – 2009 – № 7. – С. 26–27.
48. Коровин, Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки / Н.В. Коровин. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 280 с.
49. Худяков, С.А. Энергоустановки на основе топливных элементов для пилотируемых космических кораблей / С.А. Худяков // Известия РАН. Энергетика. – 2003. – № 5. – С. 48–60.
50. Ченцов, М.С. Разработка системы автономного энергоснабжения на основе твердополимерных топливных элементов / М.С. Ченцов, Д.Д. Мордовченко, В.В. Самонин // Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – № 1. – С. 71.
51. Багоцкий, В.С. Химические источники тока / В.С. Багоцкий, А.М. Скундин. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
52. Абрамович, Б.Н. Электроснабжение объектов нефтедобычи труднодоступных районов / Б.Н. Абрамович, А.В. Турышева // XXII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2010) Будущее машиностроения России. – М.: Изд-во ИМАШ РАН. – 2010. – С.100.
53. Ливинский, А.П. Пути решения проблем автономного энергоснабжения потребителей удаленных регионов России / А.П. Ливинский, И.Я. Редько, В.М. Филин // Энергетик. – 2010. – № 4. – С. 22–26.
54. Бадрызлов, Д.Г. О главных электрических схемах автономных электростанций для нефтяных месторождений / Д.Г. Бадрызлов, Ю.Б. Новоселов // Энергетика Тюменского региона. – 2003. – № 1-е. – С. 16–17.
55. Фокин, Г.А. Проблемы энергообеспечения линейных потребителей магистральных газопроводов и газораспределительных станций / Г.А.

- Фокин // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2009. – № 4-1(89). С. 121–131.
56. Мельник, Г.В. Системы автономного распределённого энергоснабжения: микротурбины / Г.В. Мельник // Двигателестроение. – 2006. – № 4. – С. 46–51.
57. Абрамович, Б.Н. Обеспечение автономного электроснабжения энергетических установок в условиях объектов нефтедобычи / Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов, А.В. Турышева // Геоэкологические и инженерно-геологические проблемы развития гражданского и промышленного комплексов города Москвы: Материалы научно-практической конференции. – М.: изд-во КДУ. – 2008. – С. 237–239.
58. Терехин, А.Н. Перспективы развития автономных источников энергоснабжения на базе газопоршневых и газотурбинных двигателей / А.Н. Терехин, И.В. Слесаренко, А.В. Горланов, Д.П. Пчельников, А.В. Разуваев // Двигателестроение. – 2007. – № 1. – С. 30–33.
59. Денисов-Винский, Н.Д. Автономные источники энергоснабжения на базе вихревой турбины, работающие на перепаде давления / Н.Д. Денисов-Винский // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2007. – № 6. – С. 10–13.
60. Бордуков, В.Т. Отечественное дизелестроение и проблемы малой энергетики В.Т. Бордуков, М.И. Левин // Двигателестроение. – 1997. – № 4. – С. 3–4.
61. Замоторин, Р.В. Малые теплоэлектроцентрали – поршневые или турбинные / Р.В. Замоторин // Энергосбережение в Саратовской области. – 2001. – № 2. – С. 3–4.
62. Киршенбаум, Р.П. К вопросу применения автономных электростанций на нефтяных месторождениях. Предпосылки применения / Р.П. Киршенбаум, Ю.Б. Новоселов // Энергетика Тюменского региона. – 1999. – №1,2. – С. 192–195.

63. Кириллов Н.Г. Повышение эффективности использования природного газа в системах автономного энергоснабжения регионов РФ на основе применения двигателей Стирлинга / Н.Г. Кириллов // Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – № 8 (40). – С. 69–71.
64. Бабич, В.Н. Установка автономного энергоснабжения с газотурбинным двигателем / В.Н. Бабич, В.В. Беляев, В.Е. Каретников, К.Н. Лагутин, С.В. Лобанов, И.К. Шумаков // Патент на изобретение № 109222 от 2011.
65. Козярук, А.Е. Автономная система энергоснабжения на базе роторно-лопастного двигателя с внешним подводом теплоты и вентильного двигателя с постоянными магнитами / А.Е. Козярук, А.А. Хитров // Электротехника. – 2011. – № 12. – С. 17–22.
66. Кириллов, Н.Г. Комбинированная теплосиловая установка на базе двигателя Стирлинг / Н.Г. Кириллов // Патент на изобретение № 2164613 от 1999.
67. Фирсов Е.В. Тригенерационная установка на базе микротурбинного двигателя / Фирсов Е.В // [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.osu.ru/doc/3166>.
68. Титиевский, А.П. Энергетическая установка с замкнутым циклом и с внешним подводом тепла «Титал-03» / А.П. Титиевский // Патент на изобретение № 2355905 от 2007.
69. Залманов, Л.Р. Возможности работы дизельной энергоустановки в экстремальных условиях / Л.Р. Залманов, П.В. Моряков // Энергетик. – 2001. – № 11. – С. 38–40.
70. Климова, Е. В. Перспективные направления развития поршневых двигателей в составе судовых энергетических установок / Е.В. Климова, А.Ф. Дорохов // «Вестник». – 2008. – № 2. – С. 132–136.
71. Терехин, А.Н. Перспективы развития автономных источников энергоснабжения на базе газопоршневых и газотурбинных двигателей / А.Н. Терехин, И.В. Слесаренко, А.В. Горланов, Д.П. Пчельников, А.В. Разуваев // Двигателестроение. – 2007. – № 1. – С. 30–33.

72. Соколов, С.В. Опыт применения микротурбинных установок / С.В. Соколов // Газотурбинные технологии. – 2008. – № 12.– С. 6–12.
73. Беседин, С.Н. Автономные газотурбинные установки малой мощности / С.Н. Беседин // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2009. – № 4-1(89). – С. 153–166
74. Рассохин, В.А. Основные направления развития микротурбинных технологий в России и за рубежом / В.А. Рассохин, Н.А. Забелин, Ю.В. Матвеев // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2011. – № 4(135).– С. 41–51.
75. Мельник, Г.В. Системы автономного распределенного энергоснабжения: микротурбины / Мельник, Г.В. // Двигателестроение. – 2006. – №4. – С. 46–51.
76. Скалкин, Ф.В. Энергетика и окружающая среда / Ф.В. Скалкин, А.А. Канаев, И.З. Копп. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 280 с.
77. Лаврус, В.С. Источники энергии / В.С. Лаврус. – М.: Информационное Издание, 1997. – 63 с.
78. Астахов, Ю.Н. Накопители энергии в электрических системах / Ю.Н. Астахов, В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1989. – 159 с.
79. «CapstoneTurbineCorporation» // [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.capstone.ru/>.
80. Энергоустановки на основе преобразователя энергии Стирлинга // [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.cleanenergy.com>.
81. Энергоустановки компании «Ormat» // [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.ormat.com/>.
82. Терехин, А.Н. Повышение эффективности установок автономного энергоснабжения с ДВС / А.Н. Терехин, С.А. Черняев, А.В. Разуваев, Ю.В. Орлов // Двигателестроение. – 2009. – № 2 (236). – С. 49–50.
83. Прутчиков, И.О. Перспективы совершенствования систем автономного энергоснабжения с АТУ / И.О. Прутчиков, В.В. Камлюк, П.В. Крупко // Морской Вестник. – 2008. – № 4. – С. 34–38.

84. Попырин, Л.С. Основные задачи управления надежностью электроснабжения объектов единой системы газоснабжения России / Л.С. Попырин, И.В. Белоусенко, С.В. Голубев, М.Д. Дильман, Г.М. Беляева // Энергетика. – 2007. – № 2. – С. 3–16.
85. Каргин С.А. Проблемы повышения энергетической эффективности транспортных энергетических установок / С.А. Каргин // Вестник. – 2011.– № 2. С. 84 – 90.
86. Феоктистов, Н.А. Принципы и системы стабилизации параметров электрической энергии при питании бытовых машин и аппаратов от автономных источников / Н.А. Феоктистов, С.В. Денисов // Тез. 2-й Международной НТК Наука-сервису. – М.: ГАСБУ. – 1997. – С. 17.
87. Ковалёв, Л.И. Эффективность газодвигательных мини-ТЭЦ / Л.И. Ковалёв // Энергетик. – 2009. – № 3. – С. 26–29.
88. Указания по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками РД 34.20.574 // М.: Союзтехэнерго. – 1984. – 10 с.
89. Дейнеко, С.В. Обеспечение надежности систем трубопроводного транспорта нефти и газа / С.В. Дейнеко – М.: Издательство Техника. 2011. – 176 с.
90. Eps operation & maintenance manual (powered by CCVT) // This document contains information that is proprietary to ORMAT SYSTEMS LTD. 2006. – part 2. – 600 p.
91. Высокоморная, О.В. 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. 139–147.
92. Высокоморная, О.В. 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.
93. Высокоморная, О.В. 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. 59–65.
94. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 2000. – 462с.
95. Hammerschmidt E.G. Formation of gas hydrates in natural gastransmission lines // Industrial and Engineering Chemistry. – 1934. – V. 26. – № 8. - P. 851-855.
96. Справочник по теплообменникам: пер. с англ.: в 2 т. М.: Энергоатомиздат, 1987. Т. 1, 1987. – 561 с.
97. Пасконов, В.М. Численное моделирование процессов тепло – и массообмена. / В.М.Пасконов, В.И. Полежаев, Л.А. Чудов. – М.: Наука. – 1984. – 277 с.
98. Джалурия, Й. Естественная конвекция: тепло – и массообмен / Й. Джалурия. – М.: Мир, 1983. – 399 с.
99. Исаченко, В.П. Теплообмен при конденсации / В.П. Исаченко. – М.: Энергия, 1977. – 239 с.
100. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
101. Муратова Т.М., Лабунцов Д.А. Кинетический анализ процессов испарения и конденсации // Теплофизика высоких температур. 1969. Т. 7. № 5. С. 959–967.
102. Кнаке О., Странский И.Н. Механизм испарения // Успехи физических наук. 1959. Т. 68. № 2.

103. Авдеев А.А., Зудин Ю.Б. Кинетический анализ интенсивного испарения (метод обратных балансов) // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 4. С. 565–574.
104. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
105. Самарский, А.А. Численные методы решения задач конвекции – диффузии / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 512 с.
106. Березин, И.С. Методы вычислений / И.С. Березин И.С., Н.П. Жидков. – М.: Физматгиз, 1962. – Т. 2. – 620 с.
107. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
108. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов / В.М. Вержбицкий. – М.: Высшая школа, 2002. – 840 с.
109. Коздоба, Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. – М.: Наука, 1975. – 227 с.
110. Гаращенко, А.Н. О модификации методов решения нелинейных задач тепломассопереноса в условиях высоких градиентов температур / А.Н. Гаращенко, И.К. Жарова, Г.В. Кузнецов, В.П. Рудзинский, Г.В. Таратушкина // Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2002. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Пермь: Изд-во ПГТУ. – 2002. – С. 77.
111. Кузнецов, Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с. 4.
112. Высокоморная, О.В. 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. 02.09.2013. – № 258–В2013.

113. Кнунянц, И.Л. Химическая энциклопедия : в 5-ти томах / под ред. И. Л. Кнунянца, Н. С. Зефирова. М.: Советская энциклопедия, 1988-1998. Т. 2, 1990. – 671 с.
114. Ошин, Л. А Промышленные хлорорганические продукты / под ред. Л.А. Ошина. – М.: Химия, 1978. – 653 с.
115. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: ООО «Старс», – 2006. – 720 с.
116. Лариков, Л.Н. Тепловые свойства металлов и сплавов: справочник / Л.Н. Лариков, Ю.Ф. Юрченко. – Киев: Наукова думка, – 1985. – 439 с.
117. Высокоморная, О.В. 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.
118. Бабилов, Ю.М. Органические и кремнийорганические теплоносители. / Ю.М. Бабилов, Д.С. Рассказов. – М.: Энергия. – 1975. – 272 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Статистика технических происшествий на мини-ТЭС (мощность 4 кВт)

магистральных газопроводов «Камчатка» и «Сахалин-2»

в период с 2008 по 2012 год

№ п/п	Год ввода в эксплуатацию	Время наработки, м/час	Причины технических происшествий в работе энергоустановок								Дата выхода из строя
			Обрыв пламени горелочного устройства	Механическая неисправность турбоагрегата	Нестабильное напряжение на аккумуляторных батареях	Некорректная работа КИПиА	Предельно высокая температура в конденсаторе	Останов в следствии нестабильной работы	Неисправность системы пожаротушения	Другие технические происшествия	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2011	5550									
2	2011	2800	14.10.11 16.10.11 17.10.11			23.01.12					23.01.12
3	2011	5800		01.09.12			17.11.11				01.09.12
4	2011	2650		21.02.12				23.09.11			21.02.12
5	2011	7950									в работе
6	2011	7600									в работе
7	2011	8200	07.11.11 22.11.11 28.11.11 03.12.11								в работе
8	2011	5350	22.11.11	15.06.12							15.06.12
9	2011	8250									в работе

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	2011	7100	19.10.11 22.11.11 26.11.11 03.12.11 06.12.11	23.06.12							23.06.12
11	2011	8200	17.10.11 19.10.11 16.11.11 22.11.11 28.11.11 06.12.11								в работе
12	2011	20		04.10.11							04.10.11
13	2011	7900	04.12.11	06.07.12							06.07.12
14	2011	8600	22.11.11								в работе
15	2011	7150	17.11.11 23.11.11 28.11.11	04.08.12							04.08.12
16	2011	6800		01.09.12							01.09.12
17	2011	6356					26.06.12				26.06.12
18	2011	6732	17.11.11 06.12.11	26.08.12	09.10.11						26.08.12
19	2011	4200		01.05.12							01.05.12
20	2011	7092		01.09.12							01.09.12
21	2011	3650		14.05.12							14.05.12
22	2011	8548		01.11.12							01.11.12
23	2011	168									в работе
24	2011	144									в работе
25	2011	1608									в работе
26	2011	750									в работе
27	2011	1500									в работе
28	2011	312									в работе
29	2011	72									в работе
30	2011	290									в работе

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
31	2011	90									в работе
32	2011	960									в работе
33	2011	0									смонтирована и готова к работе
34	2011	12936									в работе
35	2008	24480				02.03.11 22.07.09 31.08.10	27.05.09 04.10.09 31.01.10 11.03.10 04.05.10 07.06.10	14.05.11	27.02.11	04.02.12	в работе
36	2008	32136				14.08.11					в работе
37	2011	8970		15.01.12							в работе
38	2008	17640		18.08.10							в работе
39	2010	6930		20.10.10							в работе
40	2008	12048		22.01.10							в работе
41	2008	29784		11.02.12		09.08.11				06.06.09 20.11.09	в работе
42	2008	17088		22.08.10						24.07.09	в работе
43	2012	7560									в работе
44	2008	24240	02.03.11	05.06.11					22.07.09	03.06.09 20.06.09 21.07.09 01.10.09	в работе
45	2011	9720									в работе
46	2010	11880		16.05.11		22.05.10				16.05.11	в работе
47	2012	6432									в работе
48	2008	28104		16.11.11						10.11.09	в работе
49	2011	9744									в работе
50	2011	9792		28.07.11							в работе
51	2008	24336		09.06.11			12.06.10 21.08.10		20.01.10		в работе
52	2008	15024		26.05.10		09.03.10				24.01.10	в работе
53	2008	26472	04.01.11	10.09.11		28.08.10				10.01.10 18.06.10 19.12.10	в работе
54	2008	21000		20.01.11		19.01.10	23.09.10		16.12.10 19.12.10		в работе

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
55	2010	27912	04.06.11			26.03.11 19.02.11 28.01.11				29.05.11	в работе
56	2011	15192									в работе
57	2008	27480		20.10.11						30.10.10 17.12.10	в работе
58	2011	15264	19.03.11								в работе
59	2008	22272		13.03.11		03.08.10 08.09.10	22.06.10 22.09.10 22.09.10				в работе
60	2008	25392	05.05.10	17.08.11	15.02.20 10	11.04.11	14.06.10			04.01.10 08.12.10 09.12.10	в работе
61	2011	14160									в работе
62	2008	21264		01.02.11		30.04.10 17.05.10	26.07.10			31.01.10	в работе
63	2011	15336				11.03.11					в работе
64	2011	14208				04.04.11				26.04.11	в работе
65	2008	23496		04.05.11			13.06.10 24.09.10			23.03.10 15.12.10 17.12.10	в работе
66	2008	19584		06.12.10		29.04.10 15.05.10 17.06.10 26.08.10	27.07.10			09.01.10 25.10.10	в работе
67	2008	27456		19.10.11		14.05.10	27.07.10				в работе
68	2008	30672		03.03.12						09.04.10	в работе
69	2010	4200		26.06.10			03.06.10			10.04.10	в работе
70	2011	11328									в работе
71	2012	5064									в работе
72	2008	23184		27.12.10			28.07.10 31.08.10		02.01.10	28.04.10	в работе
73	2008	28896	20.11.11	19.12.11			29.08.10				в работе
74	2008	25392		23.07.11			01.06.10			27.01.11	в работе
75	2008	29688	29.09.11			02.06.10					в работе
76	2008	31752		18.04.12		30.08.10		10.02.12		21.09.10	в работе
77	2011	9576									в работе
78	2011	15072					03.07.12			06.07.12	в работе
79	2008	30408		22.02.12	26.05.20 10		08.07.11				в работе

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
80	2010	4824		22.07.10						03.04.10 16.04.10	в работе
81	2011	15120									в работе
82	2008	18048		02.10.10			03.09.10				в работе
83	2011	9480					01.06.12				в работе
84	2010	17376					12.07.11 11.06.11 19.06.11 27.03.11 30.03.11 15.03.11 27.03.11 14.02.11 10.01.11 21.01.11 30.01.11			17.04.10	в работе
85	2011	9288					24.05.12				в работе
86	2008	27072				12.03.11	30.03.10			18.04.10	в работе
87	2011	15456					12.08.11			11.01.12	в работе
88	2008	22488		22.03.11		05.12.10				02.01.11	в работе
89	2008	11880		15.01.10						28.12.09	в работе
90	2008	24576	07.07.11	19.06.11			07.03.11				в работе
91	2008	28080			06.08.20 11		13.09.11				в работе
92	2011	9360					25.05.12				в работе
93	2008	17376		04.09.10			27.03.10				в работе
94	2008	23424		01.05.11		02.08.10				08.01.10	в работе
95	2008	20616		04.01.11							в работе
96	2011	14424				27.02.11	24.08.11			17.12.11	в работе
97	2010	4632		14.07.10				07.02.10 12.02.10		03.05.10	в работе
98	2010	19968		23.04.12						07.05.11	в работе
99	2008	24840		30.06.11			18.09.10			03.05.10	в работе
100	2008	23184		21.04.11						03.05.10 11.05.10	в работе
101	2008	25104		11.07.11	10.05.20 10		26.04.11 02.01.11 08.05.10 05.03.10 13.09.10	18.02.10		04.04.10 11.04.10 01.03.10 26.01.10 28.01.10 02.02.10 08.02.10	в работе