

На правах рукописи



**ГОНЧАРЕНКО**  
**Юрий Борисович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ  
РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ  
УГОЛЬНЫХ ТЕРМИНАЛОВ**

05.14.04 - промышленная теплоэнергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Красноярск - 2017

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» на кафедре Теплоэнергетики и теплотехники

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
Штым Константин Анатольевич

Официальные оппоненты: Руднев Борис Иванович, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет», кафедра холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, профессор

Кудряшов Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра теплоэнергетики, заведующий кафедрой

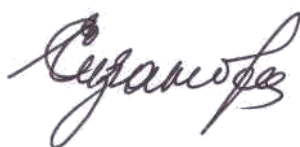
Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «20» сентября 2017 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «    » июля 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью совершенствования существующего промышленного теплоэнергетического оборудования, в частности, одной из важнейших составляющих угольных терминалов – системы разморозки и разгрузки угля на базе новых технологий и оценки качества этого оборудования с целью повышения его экономичности, надежности, безопасности и экономии энергетических ресурсов.

Согласно «Энергетической стратегии России на период до 2035 года» основными результатами реализации целевого сценария в угольной отрасли является создание новых центров угледобычи в Республике Саха (Якутия), Республике Тыва, Забайкальском крае и других регионах Сибири и Дальнего Востока, способных обеспечить рост экспорта угля со 153 до 206 млн. т. Большую роль в увеличении конкурентоспособности российского экспорта угля играют, в значительной степени, логистические затраты. Ускорение процесса разогрева угля до состояния его выгрузки из вагона, а так же минимизация затрат теплоты на этот процесс позволит получить существенную экономию при производстве разгрузочных работ.

Вопросам теплообмена в размораживающих устройствах посвящены работы Кузнецова П.Я., Лепнева М.И., Маталасова С.Ф., Михайлова Н.М., Михеева М.А., Михеевой И.М., Носкова Ю.А., Севериновой Э.П., Сизина П.Р., Щедрина Ф.Б. и др. Распространение теплоты в слое угля описывается уравнениями нестационарной теплопроводности, на основании решения которых можно правильно задать допустимый тепловой поток, определить время размораживания слоя угля заданной толщины. Аналитическое решение этой задачи, связанной с тепловыми и диффузионными процессами, приводит к сложной системе нелинейных и дифференциальных уравнений, решение которой представляет большие трудности. Ленинградским отделением института «Теплоэлектропроект» были проведены эксперименты по размораживанию углей на специальных стендах. В ВТИ проводилось экспериментальное изучение процесса разогрева слоя топлива на экспериментальной установке для нахождения эмпирических зависимостей и определения времени размораживания. Однако полученных результатов оказалось не достаточно для определения данной задачи как полностью решенной. Теплообменные процессы при разогреве угля в вагоноразмораживающих устройствах комбинированного типа изучены еще не в полной мере.

Одним из путей решения задачи повышения эффективности системы разморозки и разгрузки угля является создание децентрализованных источников комбинированной выработки тепло и электроэнергии за счет установки турбин противодавления на котельных угольных терминалов. Это позволит снизить затраты на погрузочно-разгрузочные работы, увеличить мобильность энергетической системы и повысить эффективность энерготранспортной инфраструктуры региона. На основе развития энерготранспортной инфраструктуры будет не только обеспечена энергетическая безопасность региона, но и повышена его

роль как активно развивающегося транзитно-экспортного узла, обеспечивающего поставки российских энергоресурсов на мировой рынок.

**Работа выполнена** в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники РФ Пр–577 «Энергосберегающие технологии», критические технологии «Производство электроэнергии и тепла на органическом топливе», «Системы жизнеобеспечения и защиты человека», «Энергосбережение», а также в рамках научных исследований АНО ДВФУ «НТВ Центр «Модернизации котельной техники» и при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, выделяемой по госбюджету кафедре Теплоэнергетики и теплотехники и международной лаборатории Горения и энергетики ДВФУ (договор 14.Y26.31.0003).

**Объект исследований** - промышленное оборудование для разогрева угля в портах занимающихся перегрузкой угля или на угольных ТЭС.

**Предмет исследований** - характеристики теплообменных процессов в радиационно-конвективных устройствах угольных терминалов.

**Целью диссертационной работы** является повышение энергоэффективности промышленного теплоэнергетического оборудования угольных терминалов за счет совершенствования процессов разогрева в радиационно-конвективных устройствах и использования когенерации на базе турбин противодавления.

В соответствие с поставленной целью были решены **задачи:**

1. Анализ и оценка современного состояния теории и практики существующих методов разморозки при обеспечении углем энергетических систем и комплексов. Определение направлений по повышению их эффективности.

2. Экспериментальное исследование на функционирующем промышленном размораживающем устройстве комбинированного типа.

3. Разработка численной модели процесса нестационарного теплообмена в размораживающем устройстве комбинированного типа и проверка сходимости численной модели с экспериментальными данными.

4. Численное исследование для определения теплового режима работы размораживающего устройства, позволяющего значительно сократить время разогрева угля.

5. Разработка мероприятий по повышению эффективности работы угольного терминала за счет установки турбин противодавления и новой конструкции размораживающего устройства.

**Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:**

1. Предложен новый метод снижения времени разогрева угля за счет создания режима с переменной температурой нагревательных элементов, позволяющий сократить время разогрева на 8-12 %.

2. Найдено численное решение задачи нестационарного теплообмена в тепляке с новой конструкцией нагревательных элементов.

3. Установлены зависимости скорости нагрева угля и элементов вагона от температуры нагревательных элементов, температуропроводности угля и начальной температуры груза.

4. Предложен способ повышения эффективности работы производственно-перегрузочного комплекса за счет использования когенерации, позволяющий, в отличие от существующих методов, улучшить качество обработки угля при снижении энергозатрат.

**Значение для теории.** Разработанная численная модель позволяет провести анализ основных показателей процесса нестационарной теплопередачи при разогреве смерзшегося угля, а также определить основные пути интенсификации данного процесса для сокращения времени разогрева. Результаты создают теоретическую основу для проектирования и разработки новых энергоэффективных методов в промышленном теплоэнергетическом оборудовании.

**Практическая значимость результатов работы** заключается в повышении эффективности (скорости, достоверности и точности) определения технологических и режимных параметров размораживающих устройств уже на стадии проектирования. Применяемый метод, позволяющий сократить время разогрева угля на 8-12 %, является новым в прикладной сфере и может быть использован в других областях техники и технологии.

**Использование полученных результатов.** Разработана и внедрена новая, технологически оптимизированная конструкция нагревательных элементов для размораживающих устройств. Результаты работы использовались при реконструкции четырех размораживающих устройств ППК-3 ОА «Восточный порт», предназначенных для одновременного разогрева 80 вагонов, что подтверждено актом внедрения. Накопленный опыт эксплуатации в течение длительного времени показал эффективность предложенных рекомендаций, а также безопасность при разогреве вагонов.

Результаты диссертации применяются в учебном процессе для бакалавров, магистров и аспирантов направления «Теплоэнергетика и теплотехника».

**Методология и методы исследования.** При численном моделировании использовались программные продукты ANSYS и Microsoft Excel, позволяющие решить совместную задачу нестационарного конвективного теплообмена при переносе теплоты от нагревательных панелей тепляка к стенке вагона через разделяющий слой воздуха и нестационарной теплопроводности внутри массива угля. Физический эксперимент проводится на действующем, промышленном объекте для разогрева угля, расположенного на территории специализированного угольного терминала АО «Восточный порт», с применением комплексной термометрии для определения скорости нагрева и тепловизионного исследования для снятия температурных полей в нагреваемых элементах.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена применением апробированных математических моделей и численных методов решения на базе программного комплекса ANSYS, применением сертифицированных измерительных средств, результатами экспериментальных данных полученных при проведении физического эксперимента, удовлетворительным совпадением расчётных и экспериментальных данных.

**Апробация работы.** Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: Научно-технической конференции «Молодежь и научно-технический прогресс», ДВГТУ, (Владивосток, 2000, 2002 г.); IV и V

International Young Scholars' Congress of Asia-Pacific Region Countries, FESTU, (Vladivostok, 2001, 2003 г.); Научно-технической конференции "Вологдинские чтения", ДВГТУ, (Владивосток, 2001, 2003, 2004 г.); Приморской краевой конференции энергетиков "Опыт прохождения осенне-зимнего отопительного периода 2001-02 гг. и задачи перед энергослужбами Приморского края", (Находка, 2002 г.); VIII Всероссийской конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, (Новосибирск, 2004 г.); Всероссийском IV семинаре вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике, (Владивосток, 2005 г.); 2-ой научно-практической конференции энергетиков ОАО "ДВЭУК" "Энергетический бизнес Дальнего Востока в условиях реформирования", (Владивосток, 2006 г.); Международном научном форуме студентов, аспирантов и молодых ученых стран Азиатско-Тихоокеанского региона, ДВФУ, (Владивосток, 2012 г.); Всероссийской молодежной конференции "Пути совершенствования работы теплоэнергетических устройств", ДВФУ, (Владивосток, 2012 г.); Региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ЭКСЕРГИЯ-2014», ДВФУ, (Владивосток, 2014 г.); Всероссийской конференции XXXI Сибирский теплофизический семинар, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, (Новосибирск, 2014 г.); Международной конференции "Современные технологии и развитие политехнического образования", ДВФУ, (Владивосток, 2015 г.); VIII Международном симпозиуме «Горение и плазмохимия» и Международной научно-технической конференции «Энергоэффективность-2015», КазНУ им. аль-Фараби, (Алматы, Казахстан, 2015 г.); Международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования», ДВФУ, (Владивосток, 2016 г.); Международной конференции "Thirteenth International Conference on Flow Dynamics"(Sendai, Japan, 2016).

**Личный вклад автора** заключается в постановке целей и задач, непосредственном участии в разработке: конструкции нагревательных экранов, рабочего проекта по реконструкции нагревательных экранов тепляков, численной модели процесса теплообмена для вагоноразмораживающего устройства, рекомендаций по оптимизации режимов работы тепляков, предложений по повышению энергоэффективности работы угольного комплекса за счет применения когенерации, а также в проведении экспериментального исследования и обобщении результатов экспериментальных и численных исследований.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, из них: три статьи в периодических изданиях из Перечня ВАК, две статьи в других изданиях, семь статей - в трудах Международных и Всероссийских научно-технических конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, перечня условных обозначений, использованных источников из 103 наименований. Материалы диссертации изложены на 139 страницах основного текста, включающих 80 рисунков и 9 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи. Дается описание научных положений, выносимых на защиту, указана новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** показаны проблемы, возникающие при разгрузке угля после перевозки по железной дороге на большие расстояния через области с отрицательными температурами воздуха. Выявлены основные особенности по доставке угля из Якутии и Сибири на юг Дальнего Востока. Обоснована неэффективность применения профилактических мер по борьбе со смерзаемостью угля во время перевозки железнодорожным транспортом, применительно к Дальнему Востоку. Показано, что основным способом восстановления сыпучести угля после перевозки в зимний период является его разогрев в местах выгрузки. Выполнен обзор различных способов разогрева угля в вагонах и современных размораживающих устройств, применяемых как в России, так и за рубежом. Показано, что все имеющиеся устройства, предназначенные для разогрева угля можно разделить на три группы: конвективные, радиационные и комбинированные. Приведены основные достоинства и недостатки современных размораживающих устройств.

Сделан вывод, что проблема с разгрузкой угля в зимнее время является актуальной для портов, занимающихся перегрузкой угля. Способы разогрева топлива, применяемые на ТЭС, не всегда подходят для угольных терминалов, так как за счет повышения экспорта угля в последние десятилетия, объем разгрузки в портах в несколько раз превышает количество угля, разгружаемого на самых крупных ТЭС России. Это определяет новые требования к энергоэффективности, скорости и надежности работы размораживающих устройств. На основе первой главы сформулированы основные цели и задачи исследований, проводимых в диссертационной работе.

**Вторая глава** состоит из четырех разделов. В первом разделе приведено описание процесса разгрузки угля на угольном терминале АО "Восточный порт" (рис 1). Показано, что в зимний период большую часть, до 50 % от всего времени разгрузки состава с углем, в технологической цепочке разгрузки топлива составляет процесс разогрева угля.

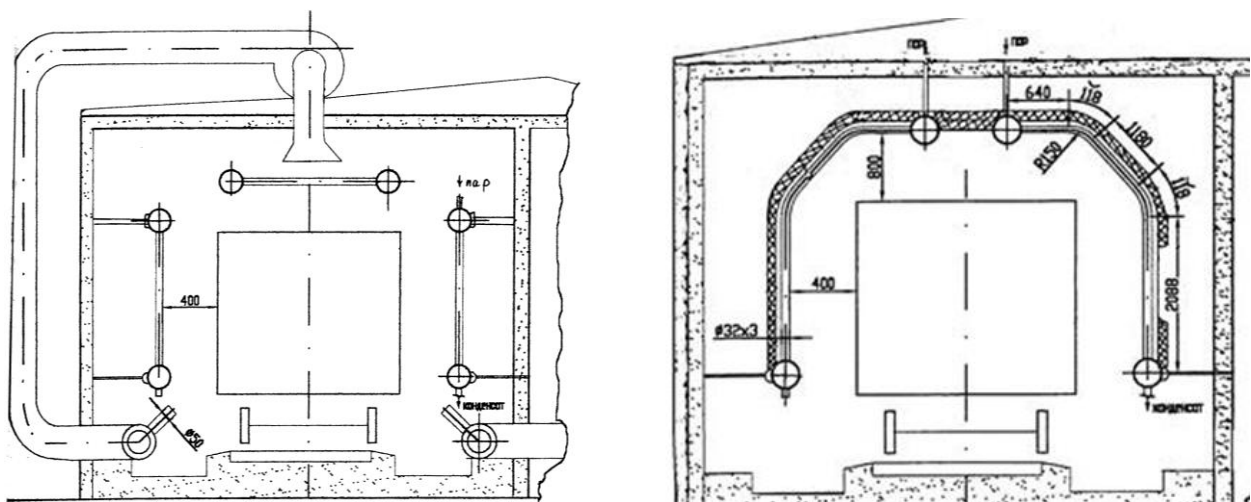
Сформулированы основные условия для разработки усовершенствованной конструкции нагревательных элементов для размораживающих устройств. Дано описание проведенной реконструкции размораживающего устройства. Изначальная конструкция представляла собой здание с несущими продольными стенками из бетона, протяженностью 300 метров.

Внутри помещения размещались паровые регистры на боковых стенах и на потолке (рис.2 а). Типовая конструкция такого размораживающего устройства предполагает оснащение дутьевыми вентиляторами, по ряду причин дутьевые вентиляторы не были установлены.



1- размораживающие устройства №1÷4 комбинированного типа; 2 -вагоноопрокидыватель №1,2; 3- размораживающие устройства №1,2 радиационного типа; 4 - устройство вибрационной очистки вагонов; 5 - основной склад угля.

Рис. 1. Общий вид угольного терминала АО "Восточный порт"



а) до реконструкции

б) после реконструкции

Рис. 2. Схема размораживающего устройства, исходный вариант

При эксплуатации размораживающих устройств "исходной" конструкции возникли следующие недостатки:

- низкая скорость разогрева угля;
- локальный перегрев отдельных узлов вагонов;
- большие потери тепла через ограждающие конструкции;
- гидравлические удары при пуске из холодного состояния.



Для решения данных проблем была выполнена реконструкция размораживающих устройств №1,2. Нагревательные элементы выполнены в виде шатра (рис 2б). Подвод пара выполнен к коллекторам в верхней части нагревательных панелей, отвод конденсата осуществляется от нижних коллекторов. Трубная часть экранов покрыта листовой сталью, что делает экраны воздухонепроницаемыми. Это создает вокруг вагона массив разогретого воздуха, который взаимодействует только со стенками вагона и не контактирует со стенками размораживающего устройства. Увеличена теплообменная поверхности за счет уменьшения диаметра и шага труб в нагревательных элементах. Время разогрева сократилось, снизились тепловые потери через стенки размораживающего устройства, уменьшились удельные затраты тепла на разогрев одного вагона с углем. Для устранения локальных перегревов вагонов параметры пара на входе в размораживающее устройство понижены до 0,3-0,6 МПа. Нагревательные элементы разделили на 54 секции. Диаметры входных и выходных коллекторов уменьшили, что привело к снижению интенсивности гидравлических ударов при пусковых операциях.

В настоящее время данная конструкция используется на четырех размораживающих устройствах угольного терминала АО «Восточный порт», общей вместительностью 80 вагонов.

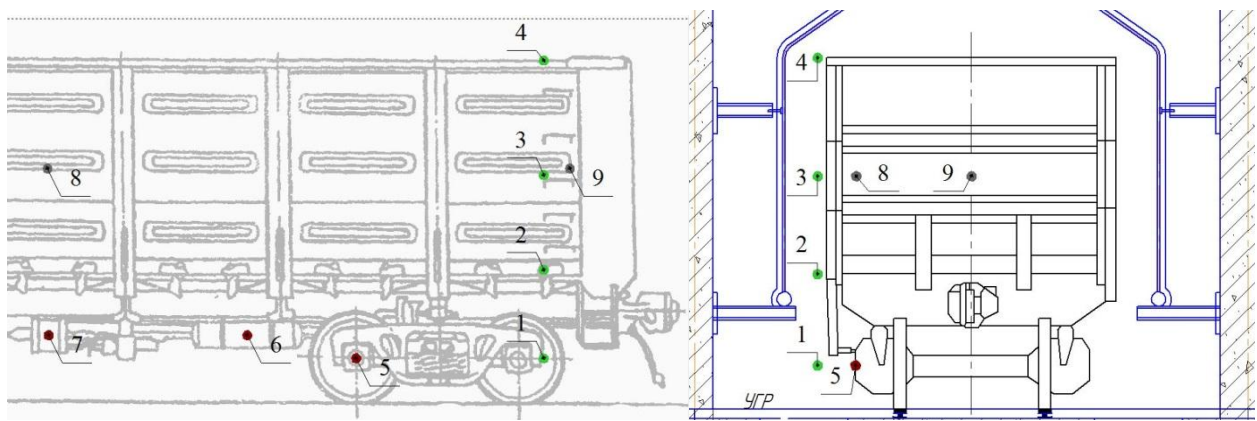
Во втором разделе приведено описание методики проведения экспериментального исследования, выполненного для решения следующих задач:

- определить скорость нагрева угля и элементов вагона;
- выявить наиболее подверженные перегреву элементы вагона;
- определить режим работы, при котором не возникает опасность повреждения элементов вагонов от воздействия температуры.

При проведении исследований измерялись следующие параметры работы размораживающего устройства: избыточное давление пара подаваемого на паровые регистры; расход пара и конденсата; температура конденсата; температура воздуха внутри размораживающего устройства на разной высоте; температура поверхности подшипника колесной пары, воздушного резервуара, тормозного цилиндра; температура угля у боковой и торцевой стенки; температурное поле вагона после разогрева.

Измерение температуры угля и воздуха производилось с помощью температурных зондов погружного типа длиной 1,6 м, измерение температуры металла выполнялось датчиками поверхностного типа. Для измерения температурного поля вагона после разогрева использовался тепловизор SAT-G90.

На контрольный вагон устанавливались датчики температуры в соответствии со схемой измерения, представленной на рисунке 3. Вагон со сгоревшим топливом помещался в размораживающее устройство. В процессе разогрева выполнялся замер температуры с шагом 5 минут. После выхода вагона из размораживающего устройства выполнялось фиксация температурного поля с помощью тепловизионной камеры. Экспериментальные исследования проведены для семи контрольных вагонов.

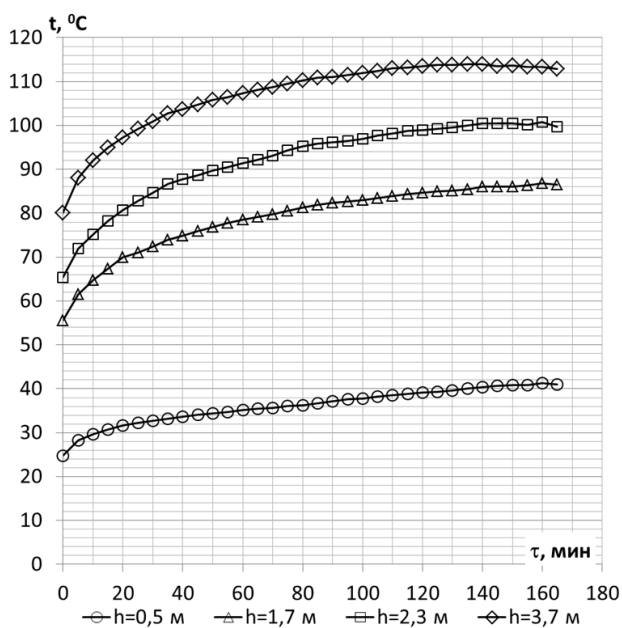


1÷4 - точки измерения температуры воздуха; 5÷7 - точки измерения температуры металла; 8÷9 - точки измерения температуры угля

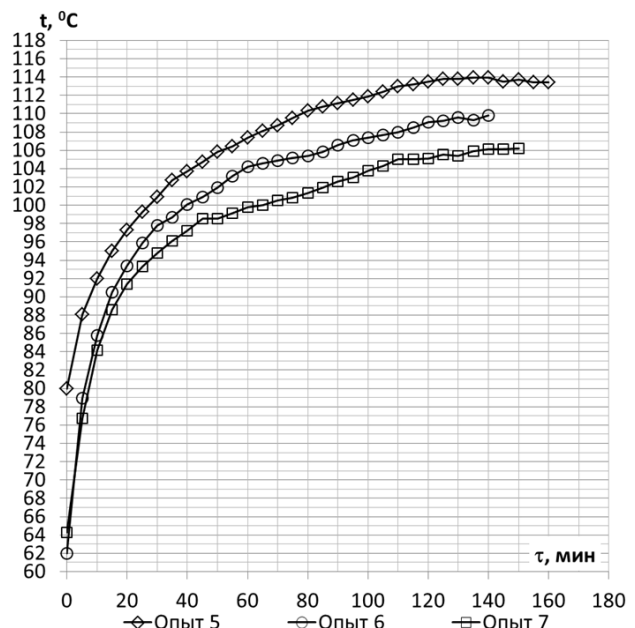
Рис. 3. Схема измерения температуры при испытании тепляков

В третьем разделе проведена оценка погрешности проведенного экспериментального исследования, которая свидетельствует о достаточной точности экспериментальных данных.

В четвертом разделе приведены результаты экспериментального исследования. На рисунке 4а приведена зависимость температуры воздуха на разной высоте в процессе нагрева. Средняя температура воздуха на уровне боковой стенки вагона изменяется от 65 - 100 °С. Воздухонепроницаемая конструкция нагревательных элементов позволяет создать массив нагретого воздуха именно в области требующей разогрева. В нижней части размораживающего устройства, на высоте  $h=0,5$  м, где находятся наиболее подверженные перегреву детали вагона, температура воздуха не превышает 45 °С. Выявлено, что температура воздуха в нижней части размораживающего устройства не зависит от давления пара подаваемого в нагревательные экраны.



а) на разной высоте



б) в верхней части при разном давлении пара

Рис.4. Температуры воздуха внутри размораживающего устройства

Температура воздуха в верхней части размораживающего устройства, на высоте  $h=3,7$  м, приведена на рисунке 4б. При увеличении давления пара подаваемого в нагревательные элементы увеличивается температура воздуха в верхней части. Изменяя среднюю температуру воздуха в размораживающем устройстве можно влиять на время нагрева угля и безопасность элементов вагона в процессе разогрева.

Уголь у торцевой стенки нагревается в 5 раз медленнее, чем уголь у боковой стенки. В процессе разгрузки основные проблемы будут связаны с прилипанием угля к торцевой стенке вагона.

Скорость нагрева металлической стенки вагона в верхней части в несколько раз превышает скорость нагрева остальных элементов. Отсутствие перегрева стенки вагона позволит обеспечить надежность остальных элементов в процессе разогрева. Необходимо контролировать температуру стенки в процессе разогрева и при необходимости снижать давление пара на входе в нагревательные элементы.

**В третьей главе** приведено описание существующей методики для определения времени разогрева угля. Экспериментальные исследования процесса разогрева слоя топлива на специальном стенде проводились во Всероссийском теплотехническом научно-исследовательском институте. Описана методика расчета, полученная ВТИ при проведении экспериментальных исследований процесса разогрева слоя топлива на специальном стенде. Данная методика не позволяет рассчитать время разогрева при изменении конструкции нагревательных панелей размораживающего устройства.

Показано, что на интенсивность процесса разогрева угля влияет большое количество факторов, при этом ряд факторов носит случайный характер. Изучение влияния указанных факторов на протекание процесса разогрева угля в натуральных условиях потребовало бы проведения множества экспериментов. Наиболее целесообразным способом изучения процесса разогрева угля в размораживающем устройстве является метод численного моделирования. Численное моделирование выполнялось с использованием программного комплекса ANSYS. Расчетная схема приведена на рисунке 5.

При разработке численной модели приняты следующие допущения:

- Задача решается в двухмерной постановке.
- Температура нагревательных элементов постоянна.
- При расчете переноса теплоты за счет естественной конвекции воздуха возле вагона, применяется приближение Буссинеска.
- При расчете переноса теплоты за счет теплопроводности внутри слоя угля рассматривается как однородная среда.
- Миграция влаги под действием температурного градиента не учитывается.
- Увлажнение воздуха внутри размораживающего устройства при размораживании угля не учитывается.

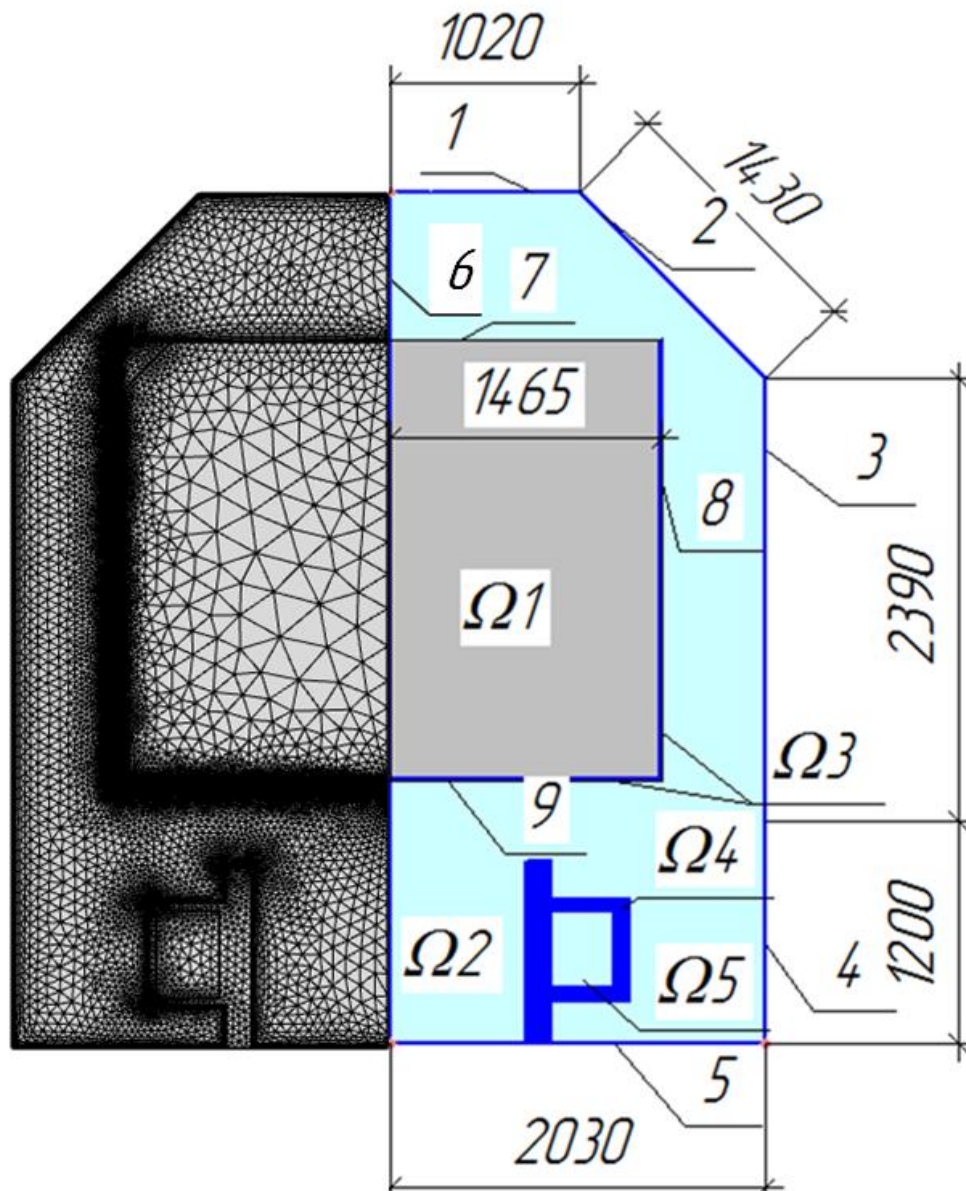


Рис.5. Геометрия расчетной области и расчетная сетка

Параметры воздуха (плотность, теплоемкость и вязкость) рассчитывались при относительной влажности 60% и атмосферном давлении 101 кПа. Уголь при расчетах рассматривался как однородная среда, в качестве теплофизических свойств использовались эффективные значения теплоемкости и теплопроводности в зависимости от плотности и влажности угля, полученные экспериментальным путем Всесоюзным научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ). При расчете теплообмена в остальных твердых телах использовались справочные значения теплоемкости, плотности и теплопроводности.

В области  $\Omega_2$ , характеризующей воздух в вагоноразмораживающем устройстве, решалась система уравнений для естественной тепловой конвекции в приближении Буссинеска. Для остальных областей использовалось уравнение распространения тепла в твердом теле для нестационарного процесса.

При расчете учитывалось тепловое излучение между поверхностями 1,2,3,7,8,9 и внешними поверхностями области  $\Omega_4$ . Воздух принят как прозрачная среда, не поглощающая излучение. Степень черноты всех поверхностей участвующих в теплообмене излучением принята одинаковой и равной 0,9.

На границах 1,2,3 задавались граничные условия 1 рода, характеризующие температуру нагревательных элементов - паровых регистров  $t_r$ , °С. На границе 4 задавались адиабатные условия, без теплообмена. На границе 5 задавались граничные условия 1 рода, характеризующие температуру поверхности  $t_{\text{пов}}$ , °С. На границе 6 задавались условия симметрии расчетной области, то есть граница 6 являлась осью симметрии для указанной расчетной области. На границе 7, 8, 9 задавались граничные условия 4 рода. На границе областей  $\Omega_2$  и  $\Omega_4$ ,  $\Omega_4$  и  $\Omega_5$  задавались граничные условия 4 рода.

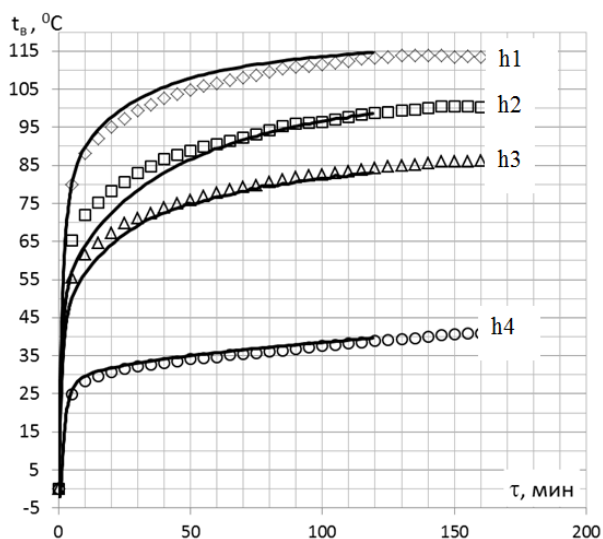
Начальная температура для всех областей ( $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$ ,  $\Omega_3$ ,  $\Omega_4$ ,  $\Omega_5$ ) задавалась равной исходной температуре угля  $t_0$ , °С.

Режим течения воздуха возле стенок вагона при заданных условиях и рассчитанном числе Рэлея  $Ra \approx 1,3 \cdot 10^{11}$  характеризуется как турбулентный. В качестве замыкающей модели турбулентности использовалась стандартная k-ε модель с константами замыкания:  $C_m=0,09$ ;  $S_k=1,0$ ;  $S_\epsilon=1,3$ ;  $C_1=1,44$ ;  $C_2=1,92$ . В расчетной области была построена неструктурированная сетка с использованием треугольных элементов с 5-ю тетраэдральными слоями в пристенной области.

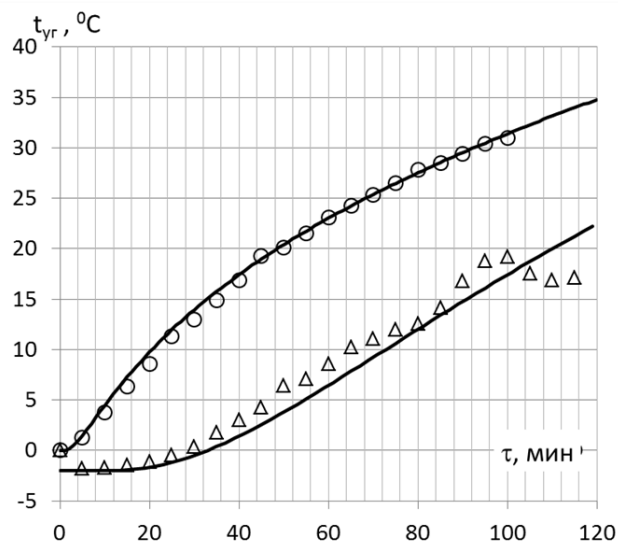
Для проверки адекватности разработанной модели выполнено сопоставление расчетных данных с результатами эксперимента. По результатам сопоставления (рис. 6) температуры воздуха внутри размораживающего устройства и температуры угля в процессе разогрева можно сделать вывод о хорошем совпадении результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

На рисунке 7 приведено поле скорости движения воздуха внутри размораживающего устройства. Интенсивное движение воздуха имеется непродолжительный промежуток времени. Максимальная скорость движения воздуха составляет около 0,9 м/с и достигается для отметки времени  $\tau=10$  с. В дальнейшем, скорость движения воздуха заметно снижается. Это свидетельствует о том, что интенсивный конвективный перенос теплоты имеется только на начальном этапе разогрева. Основная доля теплоты в процессе разогрева вагона с углем переносится за счет теплопроводности и излучения. Это объясняет полученное распределение температур с большой неравномерностью по высоте (см. рис 4а).

В **четвертой главе** показано влияние температуры пара в нагревательных элементах на скорость и безопасность процесса разогрева. Выявлено, что при разогреве угля существуют режимы, при которых уголь нагревается до требуемой температуры быстрее, чем перегревается стенка в верхней части вагона до предельно допустимого значения. Такой режим является безопасным. Получено предельное значение температуры нагревательных элементов, при котором режим работы размораживающего устройства остается безопасным.

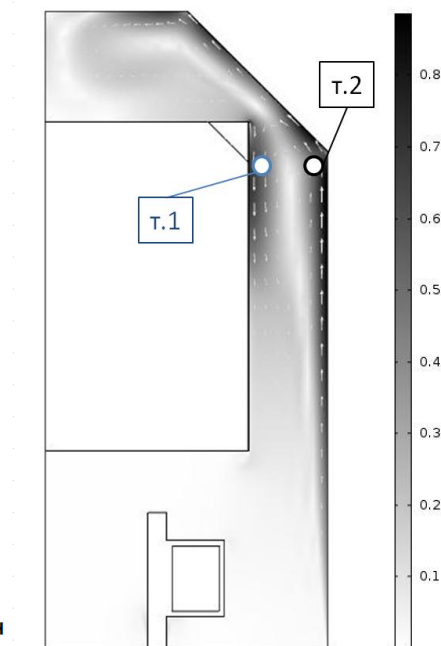
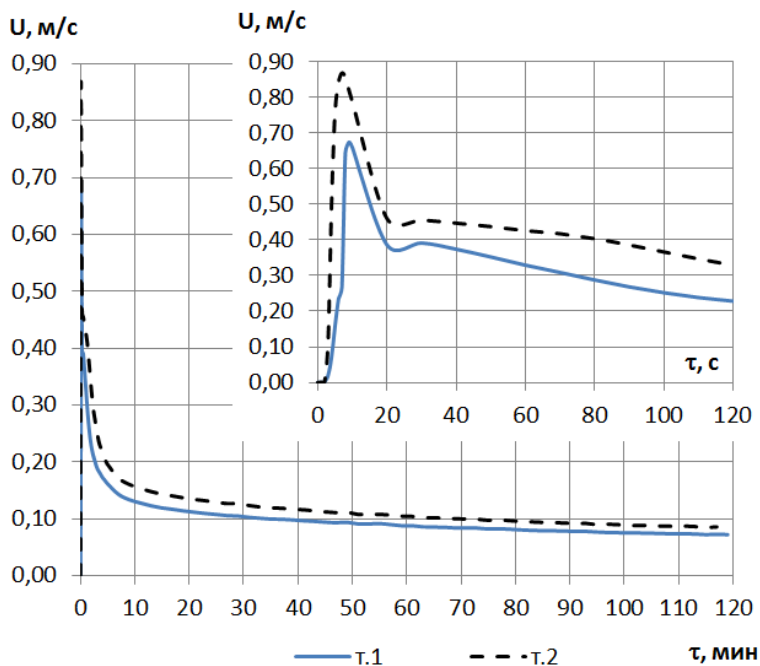


а) температура воздуха по высоте



б) температура угля

Рис. 6. Сопоставления расчетных и экспериментальных зависимостей



$\tau=10$  с

Рис. 7. Скорость движения воздуха в характерных точках

Показано, что с повышением начальной температуры груза увеличивается предельное значение температуры нагревательных элементов, при котором можно осуществлять безопасный разогрев. Оценено влияние теплофизических характеристик угля на процесс его разогрева. Получена зависимость времени разогрева от значения коэффициента температуропроводности угля. Получена зависимость давления пара в нагревательных элементах от коэффициента температуропроводности угля, при котором обеспечивается безопасный режим разогрева. Снижение коэффициента температуропроводности угля уменьшает отвод теплоты, что увеличивает скорость нагрева металлической стенки вагона. Для сохранения температуры стенки в условиях безопасных температур необ-

ходимо снижать температуру нагревательных элементов. Уменьшение коэффициента температуропроводности угля приводит к увеличению времени разогрева слоя и необходимости понижать температуру нагревательных элементов для обеспечения безопасного режима разогрева.

Предложен метод снижения времени разогрева угля за счет создания режима с переменной температурой нагревательных элементов. Сущность метода заключается в следующем: в начальный момент времени нагрев происходит с максимально возможной температурой нагревательных элементов, а по мере нагрева стенки вагона до опасного значения, температуру нагревательных элементов снижается до безопасного значения. В результате за счет увеличения теплового потока в начальный момент времени, сокращается общее время разогрева слоя угля. Рассчитано два режима с переменной температурой нагревательных элементов. Изменение температуры угля при разных режимах приведено на рисунке 8.

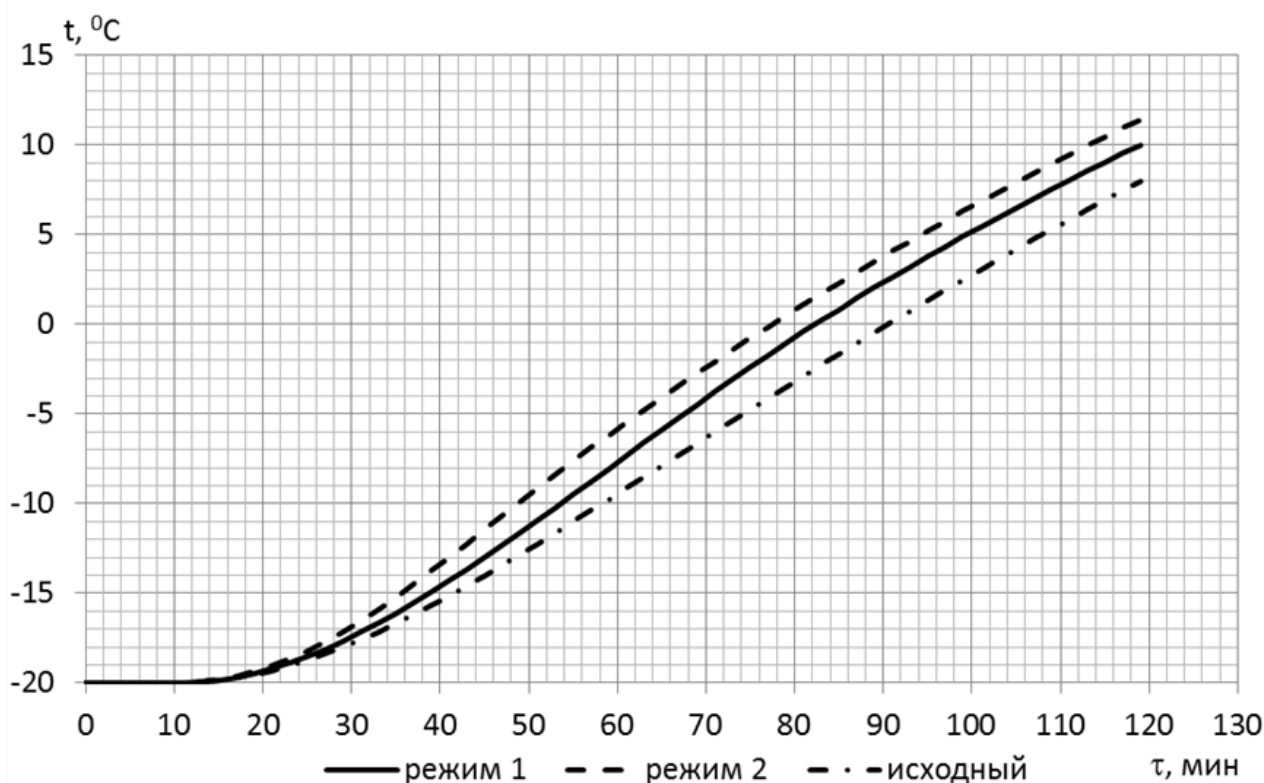


Рис. 8. Нагрев угля при режимах с переменной температурой

В режиме 1 при  $P_{\text{п}} = 0,6$  МПа ( $t_{\text{нас}} = 158,8$  °C) производился разогрев вагона в течение 55 минут, с дальнейшим понижением давления пара до  $P_{\text{п}} = 0,25$  МПа ( $t_{\text{нас}} = 127,4$  °C). В режиме 2 начальный разогрев производился при давлении пара  $P_{\text{п}} = 1,3$  МПа ( $t_{\text{нас}} = 191,6$  °C) в течение 30 минут с дальнейшим понижением давления пара до  $P_{\text{п}} = 0,3$  МПа ( $t_{\text{нас}} = 133,5$  °C). Сопоставление производилось с исходным режимом, при котором давление пара составило  $P_{\text{п}} = 0,32$  МПа ( $t_{\text{нас}} = 135,7$  °C). Снижение времени разогрева угля составило: для режима 1 - 8,5 минут или 7,9 %, для режима 2 - 13,7 минут или 12,7 %.

Предложен способ повышения эффективности работы угольного терминала за счет использования когенерации с установкой турбин противодавления.

В настоящее время перепад давлений между источником пара и потребителями полностью дросселируется. При установке турбин противодействия этот перепад давлений можно использовать для выработки электрической энергии.

Выполнен расчет тепловой схемы котельной с установленными турбинами противодействия. В результате расчёта получен годовой экономический эффект за счет снижения затрат на электроэнергию (рис. 9). Понижение давления пара за турбиной позволит получить дополнительную годовую экономию средств.

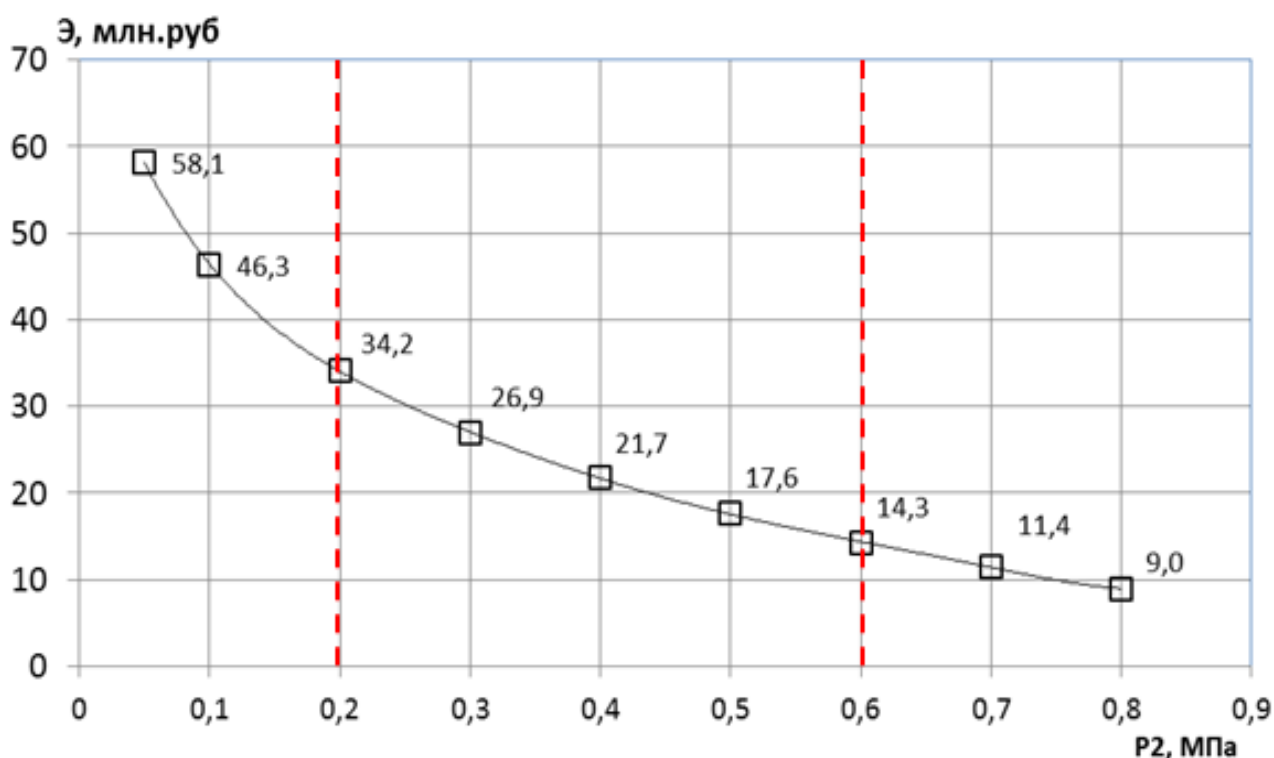


Рис. 9. Годовая экономия средств, при установке турбины противодействия, в зависимости от конечного давления пара за турбиной

Оценен эффект от проведенной реконструкции нагревательных элементов с "исходной" на "новую" конструкцию. На рисунке 10 показан расход теплоты идущей на разогрев в размораживающих устройствах с "новой" №1,2 и "исходной" №3,4 конструкцией греющих экранов, полученный в результате эксплуатационных замеров.

В качестве характерного месяца выбран январь, когда все четыре размораживающих устройства работали без перерыва. Количество теплоты  $Q_{в}$ , идущее на разогрев в размораживающих устройствах № 3 и № 4, значительно превышает количество теплоты идущее на размораживающие устройства № 1, 2.

По результатам замеров рассчитаны средневзвешенные удельные расходы теплоты на разогрев угля в размораживающих устройствах в течение года. Результаты расчетов показали, что реконструкция экранов размораживающих устройств №1,2 позволила сократить годовой расход теплоты, идущий на разогрев одного вагона, на 26,49%.



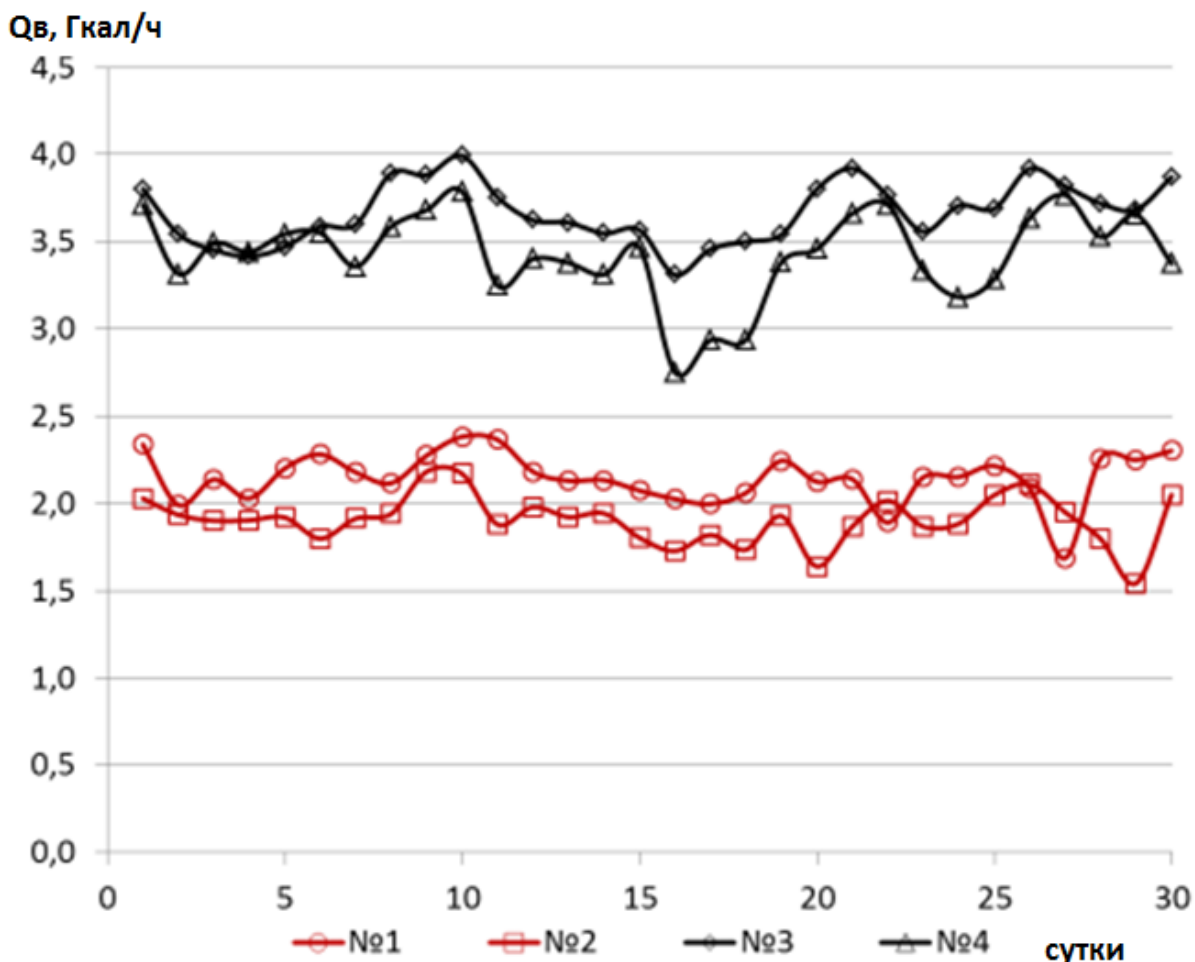


Рис. 10. Среднечасовой расход теплоты  $Q_v$  на размораживающие устройства

### Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Предложен новый метод ускорения процесса разогрева угля за счет режима с изменяющейся температурой нагревательных элементов, позволяющий сократить время разогрева на 8-12 %.

2. Найдено численное решение задачи нестационарного теплообмена в размораживающем устройстве с новой конструкцией нагревательных элементов. Качественно оценено влияние температуры нагревательных элементов, температуропроводности угля и начальной температура груза на время разогрева.

3. Проведены исследования процесса нагрева угля в размораживающем устройстве, на действующем промышленном оборудовании. Получены новые зависимости скорости нагрева угля и элементов вагона. Выявлены элементы наиболее подверженные перегреву. Определены режимы, обеспечивающие эффективный и безопасный разогрев угля.

4. Предложен способ повышения эффективности использования энергоресурсов на угольном терминале за счет использования когенерации, позволяющий повысить надежность и эффективность работы комплекса. Расчетный годовой экономический эффект за счет внедрения ресурсосберегающих мероприятий составит от 14 до 22 млн. руб.

5. Разработана и внедрена новая конструкция нагревательных элементов для размораживающих устройств. Результаты работы использовались при реконструкции четырех размораживающих устройств ППК-3 ОА «Восточный порт», предназначенных для одновременного разогрева 80 вагонов. Эксплуатационное снижение расхода теплоты на разогрев угля составило около 26,5 %.

#### **ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

##### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:**

1. Гончаренко Ю. Б., Дорогов Е. Ю. Исследование температурного режима работы тепляков конвективного типа, *Научное обозрение*. 2014. №. 7-1. 237-240.

2. Гончаренко Ю. Б., Дорогов Е. Ю. Определение температурного режима тепляков конвективного и радиационного типа, *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. №. 9421. 81-88.

3. Goncharenko I.Y.B., Dorogov E.Iu., Shtym K.A. Numerical Simulation of the Heat Transfer Process in the Radiation-Convective Deffrosting Device, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2017. 10(3). 435-443, DOI.

##### **Другие значимые публикации и материалы научно-технических конференций:**

4. Гончаренко Ю. Б., Дорогов Е. Ю., Постановка задачи при проведении исследования теплообмена в вагоне-размораживающих устройствах угольного комплекса ОАО «Восточный Порт», *Сборник тезисов региональной научно-технической конференции «Молодежь и научно-технический прогресс»*, Владивосток, 2002. - С. 95.

5. Гончаренко Ю. Б., Анализ работы вагоноразмораживающих устройств ОАО «Восточный Порт», *Сборник тезисов 5-го международного форума молодых ученых стран азиатско-тихоокеанского региона*. Владивосток, 2003.

6. Гончаренко Ю. Б., Кабалык Р.В. Различные способы разморозки твёрдого топлива, *Сборник «Вологдинские чтения»*, 2004, № 38-1, 203-205.

7. Гончаренко Ю. Б., Дорогов Е. Ю. Эффективность работы вагоноразмораживающих устройств ОАО «Восточный порт», *Сборник «Вологдинские чтения»*, 2004. № 39.

8. Гончаренко Ю. Б., Дорогов Е. Ю. Постановка задачи при исследовании процесса теплообмена на примере тепляков ОАО «Восточный порт», *Тезисы докладов VIII всероссийской конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики»*, 2004.

9. Гончаренко Ю. Б., Дорогов Е. Ю. Задачи исследования процесса разморозки угля, *сборник тезисов докладов IV семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике с совместным пленарным заседанием участников «Тихоокеанского энергетического форума 2005»*, Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2005. 107 с.

10. Гончаренко Ю.Б., Дорогов Е.Ю. Энергоресурсосбережение: Опыт ОАО «Восточный порт», *сборник: Повышение эффективности производства и*

*использования энергии на Дальнем Востоке*; ред. А.Н. Штым. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006. 306 с.

11. Гончаренко Ю. Б., Дорогов Е. Ю. Повышение эффективности размораживания твердого топлива в тепляках ОАО «Восточный порт», *Теплоэнергетика и энергосбережение*; ред. А.Н. Штым; ДВФУ. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2011.

12. Goncharenko Yuriy, Dorogov Evgeniy, Study of Heat Transfer in the Coal Defrosting Garage, *Thirteenth International Conference on Sendai International Center*, Japan Flow Dynamics, 2016, 242-243 p.

Подписано в печать XX.07.2017 г.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1.

Тираж 100 экз. Заказ № XXX

Отпечатано в типографии  
Дирекции публикационной деятельности ДВФУ  
690990, Владивосток, ул. Пушкинская, 10