

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



**ГОНЧАРЕНКО**  
**Юрий Борисович**

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

05.14.04 - промышленная теплоэнергетика

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Штым Константин Анатольевич

Владивосток - 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Восстановление сыпучести смерзшегося угля .....	11
1.1 Проблемы, возникающие при разгрузке смерзшегося топлива .....	11
1.2. Конвективные размораживающие устройства.....	29
1.3. Радиационный метод разогрева вагонов .....	36
1.4. Размораживающее устройство с комбинированным подводом тепла .....	44
1.5 Цели и задачи исследования .....	47
Глава 2. Реконструкция размораживающего устройства и экспериментальное исследование режимов его работы. ....	48
2.1 Реконструкция размораживающих устройств угольного терминала АО "Восточный порт" .....	48
2.2 Методика проведения эксперимента .....	58
2.3 Оценка погрешности эксперимента.....	61
2.4 Результаты экспериментальных исследований .....	63
Глава 3. Численное моделирование процесса теплообмена в размораживающем устройстве. ....	77
3.1. Исследование процесса переноса тепла при разогреве угля. ....	77
3.2 Основные уравнения описывающие распространение тепла при разогреве угля в размораживающих устройствах .....	85
3.3 Начальные и граничные условия.....	89
3.4 Корректировка расчетной температуры паровых регистров .....	94
3.5 Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными .....	96
Глава 4. Повышение эффективности работы теплоэнергетического оборудования угольных терминалов.....	100
4.1 Влияние температуры пара на работу размораживающего устройства.....	100

4.2 Влияние характеристик угля на скорость разогрева.....	104
4.3 Влияние переменной температуры пара в нагревательных элементах на время разогрева.....	107
4.4 Установка турбин противодавления на котельной угольного комплекса.....	110
4.5 Оценка эффективности модернизации размораживающего устройства.....	119
Заключение .....	124
Список условных обозначений.....	126
Список используемых источников.....	128
Приложение 1. Акт внедрения АО "Восточный порт".....	139

## Введение

**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 [49]. 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.

В зимний период уголь, доставляемый к конечным потребителям в основном в железнодорожных вагонах, в процессе доставки примерзает к бортам и днищам вагонов. В результате, смерзшийся уголь невозможно быстро выгрузить из вагонов ни в одном из имеющихся в настоящее время разгрузочных устройств. Для борьбы со смерзаемостью предусматривается применение профилактических мер или восстановление сыпучести смерзшегося топлива перед разгрузкой [47], [77]. Такие способы профилактики, как предварительная подсушка угля, замораживание с перелопачиванием требуют значительных капиталовложений, сложных погрузочных устройств в местах отправки угля и существенных затрат времени на эти операции. В качестве профилактических мер может применяться обмасливание внутренних поверхностей вагонов перед погрузкой угля. Для этого применяются тяжелые масла коксохимического производства, профилактические жидкости ниогрин и северин или другие реагенты, позволяющие понизить температуру

смерзания [8], [37], [98], [99]. При этом профилактические жидкости могут наноситься только на стенки вагона, а могут, помимо нанесения на стенки вагона, добавляться в топливо. Однако обмасливание не может устранить полностью смерзание угля, а только ослабляет процесс его примерзания к стенкам и днищу вагона.

В результате необходимость предварительного разогрева угля в вагонах непосредственно перед процессом разгрузки на данный момент является основным способом восстановления сыпучести смерзшегося топлива на угольных ТЭС и портах занимающихся перевалкой угля [66], [100]. На разогрев угля в размораживающих устройствах расходуется тепловая энергия. Помимо этого продолжительный процесс разогрева приводит к потерям времени, связанным с разогревом, а так же возможному перегреву деталей по условиям надежной эксплуатации [87]. Ускорение процесса разогрева угля до состояния его выгрузки из вагона, а так же минимизация затрат тепла на этот процесс позволит получить существенную экономию при производстве разгрузочных работ.

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 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, увеличит мобильность энергетической системы и повысит 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 Центра «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** - энергетические системы и комплексы 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 создания автономных децентрализованных источников электропитания 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 разо-

греве 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 так же 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.

## Глава 1. Восстановление сыпучести смерзшегося угля

### 1.1 Проблемы, возникающие при разгрузке смерзшегося топлива

По экспорту угля в последние годы Россия уверенно занимает третье место в мире [36]. Почти 70 % угля экспортируется через морские порты России. Основными импортерами российского угля являются: Япония, Южная Корея и Китай. Крупнейший порт (рис. 1.1), осуществляющий перевалку экспортного угля - это порт Восточный и его угольный терминал (26%).

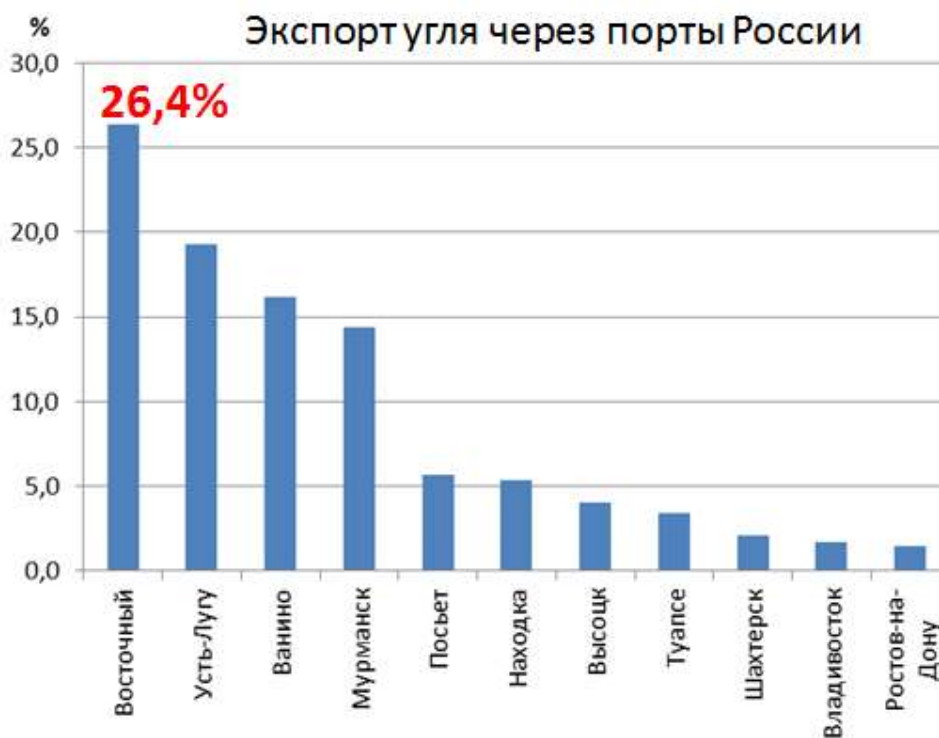


Рис. 1.1. Экспорт угля через порты России.

Основные районы добычи угля находятся очень далеко от морских портов, и внутренние перевозки угля практически полностью осуществляются железнодорожным транспортом [56]. Перевозка твердых грузов, в том числе и угля, на Дальнем Востоке имеет ряд особенностей. Первой особенностью является удаленность объектов потребления угля от основных месторождений (рис.1.2). Так, например, Артемовская ТЭЦ, расположенная на юге Приморского края, запроектированная на сжигание углей Южно-Якутского бассейна, находится на удалении около 2400 км от месторождения, время угля в пути около 3-7 дней. Крупнейший

в России порт занимающийся перевалкой угля, "Восточный порт" был построен для экспорта углей Южно-Якутского и Кузнецкого бассейна [83]. Удаленность от Кузнецкого бассейна составляет около 5800 км, время в пути около 5-10 дней.



Рис. 1.2 Расположение месторождений и потребителей угля

Второй особенностью при транспортировке является большой перепад температур по пути следования груза. На рисунке 1.3 и 1.4 показаны температуры воздуха по пути следования железнодорожных вагонов от Кузнецкого и Южно-Якутского бассейна до Владивостока.

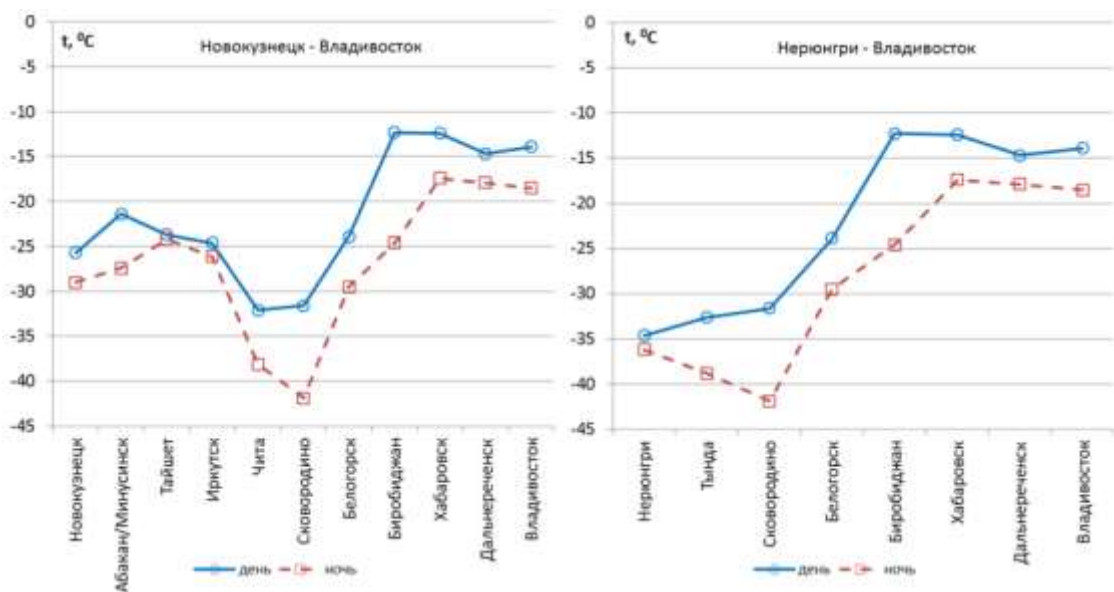


Рис.1.3. Температура воздуха по пути движения вагонов (январь)

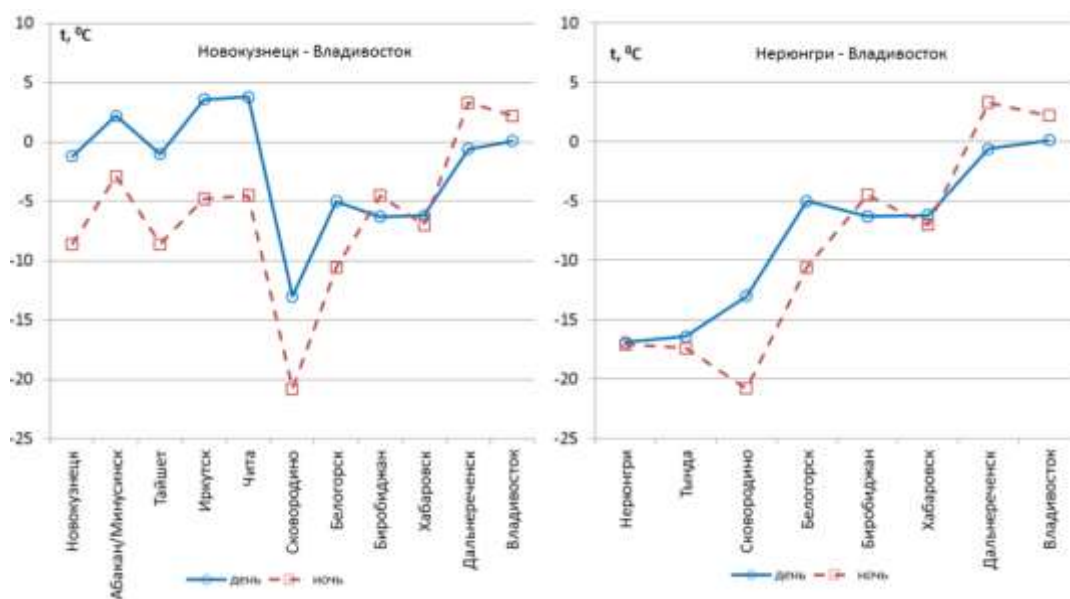


Рис.1.4. Температура воздуха по пути движения вагонов (март)

Как видно из рис. 1.3 уголь, перед тем как попасть на юг Приморского края, проходит климатическую зону с очень низкими температурами. Несмотря на то, что во Владивостоке температуры в зимний период редко опускаются ниже отметки  $-25^{\circ}\text{C}$ , уголь в вагонах по приходу из удаленных месторождений может иметь температуру  $-35\div-40^{\circ}\text{C}$ . В осенне-весенний период (рис.1.4) возникает ситуация, когда по пути следования груза происходит его частичное оттаивание, за счет нахождения в населенных пунктах с температурой выше  $0^{\circ}\text{C}$ , а затем его смерзание при прохождении областей с более низкой температурой. В результате пристенный слой угля подвергается периодическому оттаиванию и замерзанию, что приводит к появлению монолитной фракции прочно соединенной со стенкой вагона.

Промерзание угля представляет собой сложный теплофизический процесс, сопровождающийся миграцией влаги, изменением температуры, что в первую очередь зависит от температуропроводности, теплопроводности и теплоемкости груза [98]. Влияние отрицательных температур на условия перевозки грузов железнодорожным транспортом посвящены исследования Бороздина В.С. [17], Владимирова А.Н. [24], Вайнера Б.М. [21], Иванова Н.С. [42],[43], Кожевникова Н.Н.

[48], Лепнева М.И. [53], [54], [55], Маталасова С.Ф. [61], [62], [63], Носкова Ю.А. [71], Севериновой Э.П. [90], Повороженко В.В. [80], Смирнова Е.К. [92], Разина Г.М. [85] и также зарубежных специалистов Ю. Видовского [23], К.Ханна [103] и др.

На смерзаемость углей влияют такие факторы, как продолжительность воздействия низких температур окружающей среды, влажность угля, степень его метаморфизма, а также состав минеральных примесей, гранулометрический состав, степень гидрофильности поверхности. Главная причина смерзания - влажность груза [62].

Примерзший уголь невозможно быстро выгрузить из вагонов ни в одном из имеющихся в настоящее время разгрузочных устройств. Все известные способы борьбы со смерзаемостью можно разделить на три группы:

- применение профилактических мер;
- восстановление сыпучести смерзшегося топлива за счет механического воздействия;
- восстановление сыпучести смерзшегося топлива за счет разогрева перед разгрузкой.

В качестве профилактических мер при транспортировке угля по железным дорогам России [82] грузоотправителями должны применяться следующие мероприятия:

- обмасливание угля;
- нанесение на внутреннюю поверхность вагона ниогрина;
- нанесение на внутреннюю поверхность вагона северина;
- смешивание сухого угля с влажным;
- пересыпка угля древесными опилками;
- предварительное промораживание угля.

Обмасливание производится тяжелыми маслами коксохимического производства при помощи специальных обмасливающих установок. Обмасливаюю подвергается только масса топлива, стены и пол вагонов не подвергаются допол-

нительной обработке. Количество добавляемого масла варьируется от 1 до 2 %, в зависимости от температуры наружного воздуха.

При использовании профилактических жидкостей ниогрин и северин, помимо добавления в топливо, дополнительно с помощью форсунок производят нанесение этих жидкостей на пол и стены вагона. Ниогрин применяется при температурах наружного воздуха до минус 25°C, северин - при температурах ниже минус 25°C. Количество профилактической жидкости добавляемой в уголь варьируется в зависимости от влажности топлива и температуры наружного воздуха, но не должно превышать 1 % от массы топлива.

Однако при транспортировке на далекие расстояния уголь все равно примерзает к кузову вагона. Объясняется это тем, что обмасливание и применение профилактических жидкостей не может устранить полностью смерзание угля, а только ослабляет процесс его примерзания к стенкам и днищу вагона. В результате такой вид профилактики является не эффективным при транспортировке на большие расстояния, что характерно для доставляемого в порты Дальнего Востока топлива. Нерешенной проблемой является очистка кузовов вагонов от масла, северина или ниогрина в случае ремонта вагона или его использования для перевозки других грузов. Кроме того, масла оказывают разрушающее действие на конвейерные ленты.

Вышесказанное позволяет сделать выводы, что обмасливание угля перед погрузкой, а так же использование ниогрина или северина имеет весьма ограниченную сферу применения, оно целесообразно лишь при транспортировке угля на небольшие расстояния до 100 км в собственных вагонах кольцевыми маршрутами.

Добавление сухого угля к влажному производится путем послойной пере-сыпки, при этом один слой сухого угля насыпается на пол вагона и два слоя - по высоте погрузки. Основной эффект, в данном случае, достигается за счет снижения общей влажности угля ниже безопасной величины  $W^6$ , при которой не происходит смерзания частиц и топливо сохраняет сыпучесть и при отрицательных

температурах [98]. В результате если исходная влажность достаточно высока, то итоговая влажность остается выше значения безопасной величины  $W^0$ , и топливо смерзается. К дополнительным недостаткам данного способа можно отнести следующее: низкая эффективность при большой влажности исходного топлива, не всегда имеется необходимое количество сухого угля, при хранении больших запасов сильно сухой уголь вызывает интенсивное пыление.

Посыпание днища опилками практически не дает эффекта: сухие угли и без опилок не смерзаются, а при загрузке влажных углей опилки быстро намокают и смерзаются аналогично углю.

Предварительное промораживание угля до погрузки производится путем перемешивания его экскаватором или другими механизмами. В результате груз получается в виде небольших смерзшихся кусков. Такая технология предохранения груза от смерзания в вагонах применяется при погрузке массовых грузов в условиях устойчивых низких температур [78]. Промораживание считается законченным после достижения в середине слоя пересыпаемого груза температуры минус  $3^0\text{C}$  и ниже.

При больших объемах погрузки угля, например в промышленной энергетике, такие способы, как предварительная подсушка угля, замораживание с перелопачиванием, добавление несмерзающихся материалов или веществ, понижающих температуру смерзания угля требуют значительных капиталовложений в сложные погрузочные устройства в местах отправки угля, что приводит к существенным затратам и увеличению времени на эти операции.

В зарубежной практике широко используются профилактические способы, предотвращающие смерзаемость топлива. Хлористый кальций применяется в качестве профилактического средства при перевозке угля, руды и строительных материалов в США, Канаде, Польше, Чехии, Англии и Швеции. На первой стадии хлористый кальций при контакте с водой образует гидрат с выделением тепла. На второй стадии образуется водный раствор с пониженной температурой замерзания. Он применяется в растворе или твердом виде. Расход хлористого кальция за-



висит от температуры, рода груза и его влажности и составляет от 0,3 до 6 % от массы груза. К преимуществам применения хлористого кальция можно отнести: низкая стоимость; отсутствие запаха и загрязнений; минимальная опасность для здоровья людей; отсутствие агрессивного воздействия на транспортное средство. Недостатком является короткое время действия, не превышающее 4 суток, после чего грузы смерзаются даже при небольших отрицательных температурах [40].

В США для предотвращения смерзаемости угля применяют добавки масла в уголь. Расходы масла составляют 7-8% [79].

Представляет интерес опыт Польши по применению антиадгезионных покрытий [23]. Применение в полувагонах облицовки из полиэтиленовых плит дает прочное покрытие, предотвращающее примерзание грузов в течение нескольких лет. Покрытие из асфальто-латексного сырья, модифицированного полимерами, обеспечивает работу вагона в течение всего зимнего сезона. В ряде других стран также применяются покрытия из специальных гидрофобных материалов: полиэтилена, полипропилена, силикона, полихлорвинила, тефлона и др.

В Польше применяется метод блочного замораживания грузов, заключающийся в формировании отдельных блоков из смерзшегося материала [40].

Эффективным способом предохранения сыпучих материалов от смерзания при перевозке служит применение специальных вагонов с обогревающим оборудованием. Такие вагоны нашли применение в Германии, Польше, США и Чехии. В Германии применяются газовые горелки для прогрева стенок вагонов в морозные дни транспортирования топлива. В Польше для этой цели применяют электрообогрев от контактной сети, а в случае задержки с разгрузкой топлива на путях надвига вагонов имеется кабельная разводка для электропитания обогревательных установок.

Однако ни один из вышеперечисленных профилактических способов не гарантирует отсутствие смерзания топлива при перевозке. Поэтому в пунктах разгрузки (на угольных ТЭС, в портах занимающихся перевалкой угля) необходимо организовывать возможность выгрузки смерзшегося топлива.

В эксплуатации на пунктах разгрузки применяются два способа, облегчающих разгрузку вагонов со смерзшимся углем: механическое воздействие в процессе разгрузки и разогрев угля перед его разгрузкой.

Очень часто в портах используется устаревшая технология грейферной выгрузки угля из полувагонов [44]. Использование данной технологии возможно только при малых объемах выгрузки угля. Когда объемы возрастают, данная технология приводит к массовому повреждению вагонов при выгрузке. В 2011 г. из общего объема поврежденных вагонов Дальневосточного региона основная доля приходилась на морские порты (36 тыс. вагонов или 84 %) [20]. Основная причина такого положения дел это повсеместное использование в морских портах грейферной выгрузки. По сравнению с 2010 г. рост повреждаемости вагонов за счет увеличения грузооборота составил 32 % [19].

Более совершенным способом механической разгрузки смерзшегося топлива является использование специальных бурорыхлительных машин или виброрыхлителей. Основным недостатком таких машин является низкая производительность, такие машины целесообразно применять в пунктах с объемом выгрузки до 500 тыс. т в год [13].

При больших объемах разгрузки, единственным способом обеспечить выгрузку смерзшегося топлива является разогрев вагонов. Топливо в вагонах промерзает обычно на глубину, не превышающую  $0,3 \div 0,4$  м. Затруднения при выгрузке обуславливаются в основном примерзанием частиц к стенкам и полу вагонов. Разогрев стенки и прилегающих к ней слоев топлива до температуры  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (или несколько выше) полностью устраняет эти затруднения.

При разгрузке вагонов вагоноопрокидывателем, разогрев вагонов является достаточным (для беспрепятственной их выгрузки на вагоноопрокидывателе) при оттаивании угля на глубину 5 мм для проходных размораживающих устройств и на глубину 20 мм для тупиковых [87]. При разгрузке вагонов через нижние люки приходится разогревать слой топлива у стенки на глубину  $20 \div 50$  мм, в зависимости от глубины промерзания. Для того чтобы исключить обратное

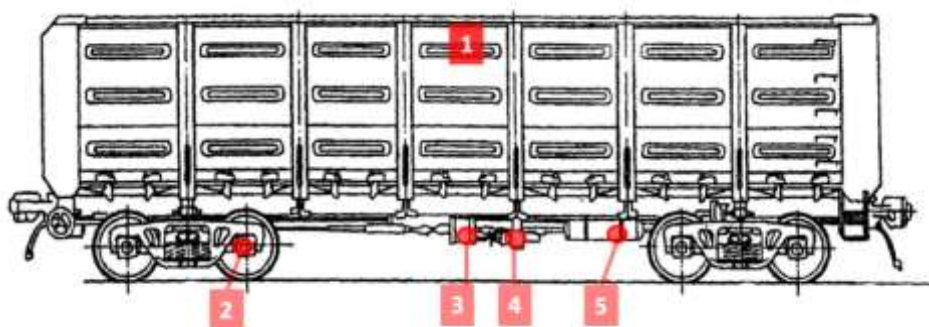
примерзание слоя топлива к стенкам вагона, толщину разогретого слоя увеличивают в зависимости от времени пребывания вагонов на открытом воздухе перед опрокидыванием и от температуры наружного воздуха. На маневровые операции при передаче вагонов из размораживающего устройства к вагоноопрокидывателю обычно затрачивается  $20 \div 30$  мин.

Одной из основных задач при работе размораживающих устройств, помимо разогрева груза, является поддержание таких условий, в которых бы не возникала опасность повреждения элементов вагонов от воздействия температуры [31]. Ограничения максимальной температуры различных деталей полувагона при его разогреве в размораживающее устройство приведены в табл. 1.1, схема расположения узлов полувагона приведена на рис. 1.5.

Таблица 1.1

Максимальная температура различных деталей полувагона

№пп	Наименование	t, °С
1	Тормозных устройств (двухкамерного резервуара, воздухо-распределителя тормозного цилиндра и т.д.)	55 °С
2	Тормозной магистрали, воздушных резервуаров	70 °С
3	Буксового узла (подшипника колесной пары)	80 °С
4	Крышек разгрузочных устройств	130 °С
5	Металлических обшив и остальных узлов и деталей вагонов	90 °С

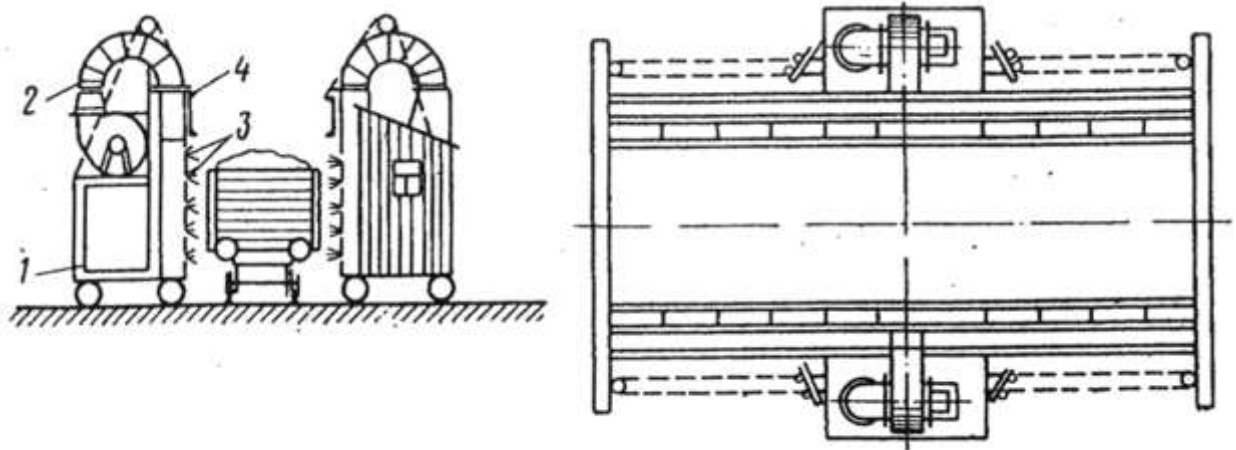


1 - стенка вагона; 2 - узел подшипника; 3 - тормозной цилиндр; 4 - воздухо-распределитель тормозного цилиндра; 5 - воздушный резервуар.

Рис. 1.5. Расположение наиболее подверженных перегреву деталей полувагона

Для разогрева вагонов со смерзшимся топливом сооружают специальные размораживающие устройства. Наиболее примитивный способ разогрева вагонов осуществляется ящиками с горящим мазутом, которые устанавливают под люками вагонов. При температуре воздуха минус  $6 \div 8$  °С этот способ оказывается достаточно эффективным, хотя и требует больших затрат ручного труда на установку ящиков под вагонами, и применение его возможно только при небольшом расходе топлива.

На рисунке 1.6 изображено упрощенное вагоноразмораживающее устройство, состоящее из небольшой топочной камеры и металлических шахт (камер) с отверстиями в стенке, обращенной к вагону.



1 – топка; 2 – вентилятор; 3 – распределительная шахта с отверстиями; 4 – заслонка.

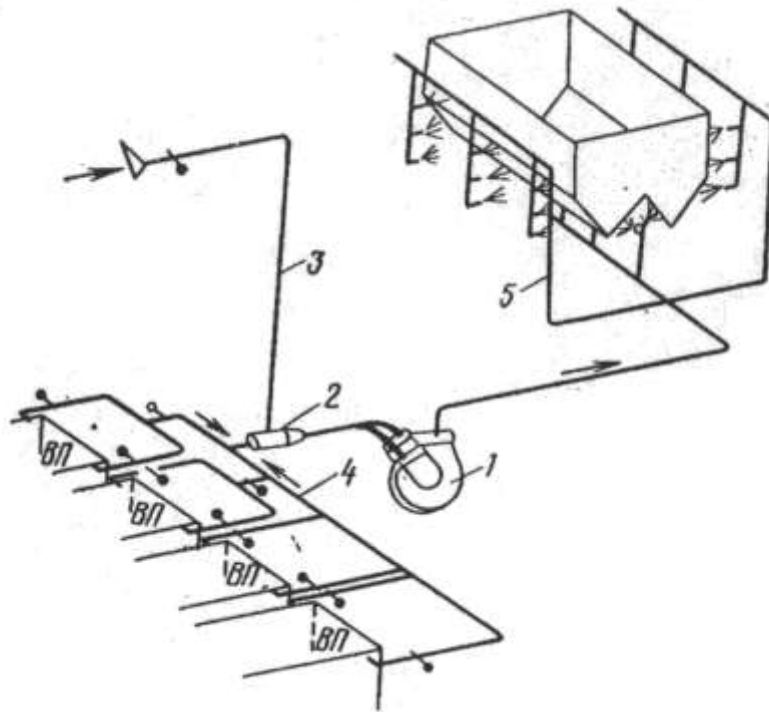
Рис. 1.6. Устройство с подвижными камерами для разогрева вагонов

Все устройство смонтировано на тележке, которую можно передвигать и устанавливать вплотную к стенке вагона. Стенки обогрываются продуктами сгорания жидкого топлива, к которым подмешивается атмосферный воздух. Смесь газов и воздуха с температурой  $180 \div 200$  °С подается в шахты и через отверстия направляется на стенки вагонов. Длина шахт 15 метров, а высота 3 метра.

По длине они разделены на отдельные секции, причем каждая секция имеет клапан для впуска газо-воздушной смеси. Это позволяет отключать отдельные секции по мере необходимости.

Смесь газов с воздухом нагнетается в камеры вентилятором производительностью 43000 м<sup>3</sup>/ч, который приводится в движение электродвигателем мощностью 14,8 кВт. Тележка передвигается электродвигателем мощностью 7,5 кВт, кроме того, имеются электродвигатели топливного насоса и привода клапанов. Общая мощность всех электродвигателей составляет 27 кВт. Расход топлива 130 кг/ч.

На Калининской ТЭЦ № 4 сооружено размораживающее устройство для разогрева вагонов с фрезторфом. Разогрев осуществляется в существующем разгрузочном сарае (см. рис. 1.7) воздухом температурой 80 ÷ 90°С.



1 – воздуходувка; 2 – смеситель; 3 – воздуховод холодного воздуха; 4 – воздуховод горячего воздуха; 5 – распределительный воздуховод.

Рис. 1.7. Размораживающее устройство Калининской ТЭЦ-4

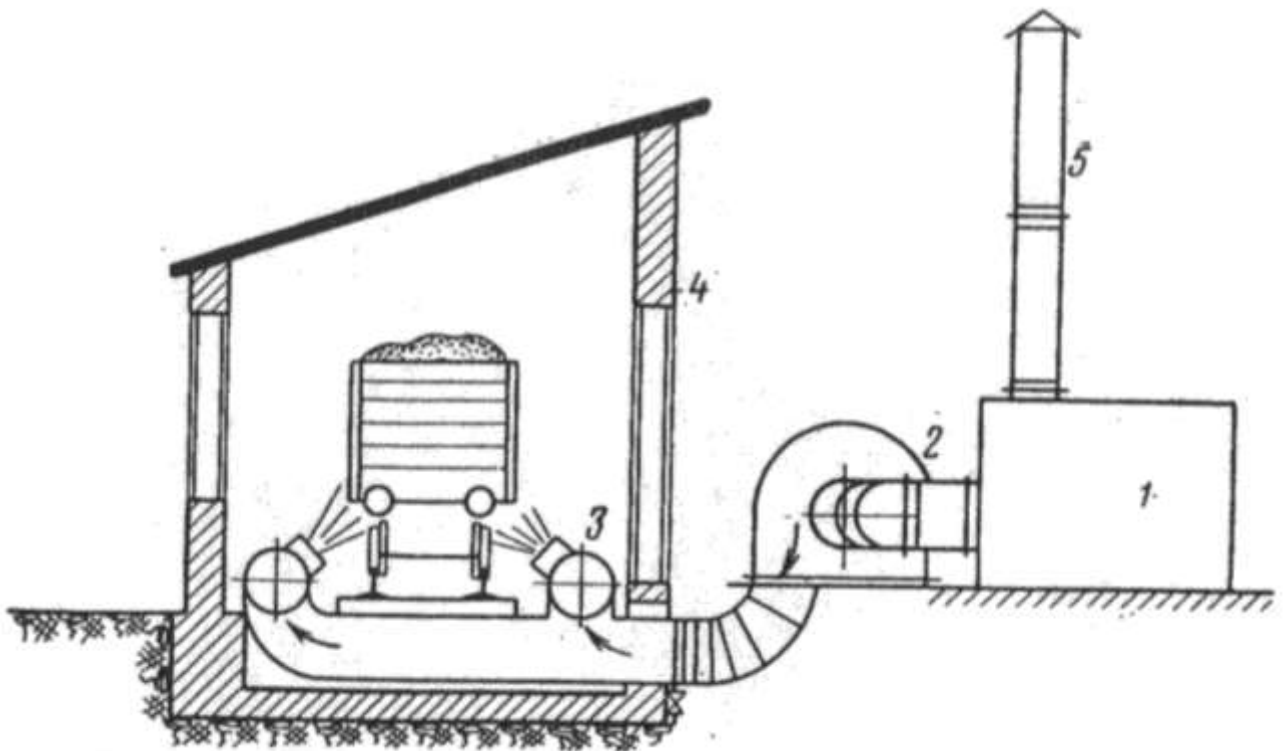
Воздух забирается от воздухоподогревателей парогенераторов ТЭЦ с температурой 290 ÷ 300 °С и по воздуховоду направляется в смеситель, в котором к нему добавляется атмосферный воздух.

Воздух с температурой 80 ÷ 90 °С вентилятором направляется в распределительные воздуховоды и через сопла подается на стенки вагонов. Скорость воз-

духа при выходе из сопел равна 10 м/с. Часть воздуха в количестве 40 % подается на вертикальные стенки вагонов, а остальная часть на нижние наклонные. Состав из 10 вагонов разогревается на этой установке в течение  $20 \div 25$  минут при толщине промерзания фрезерного торфа 50 мм и температуре наружного воздуха минус  $20 \div 25$  °С. Несмотря на то, что вагоны разгружаются через люки, серьезных затруднений при этом не наблюдается.

Более совершенным устройством для размораживания вагонов являются размораживающее устройство, представляющие собой закрытые помещения, в которых вагоны разогреваются продуктами сгорания топлива или воздухом с температурой  $100 \div 180$  °С. Для ускорения разогрева вагонов газы или воздух подаются в размораживающее устройство в больших количествах (для увеличения скорости у стенки вагона), а для уменьшения расхода топлива предусматривается их рециркуляция.

Размораживающее устройство с использованием для обогрева продуктов сгорания топлива показано на рисунке 1.8 (проект Гипрококса).



1 – топка; 2 – дымосос; 3 – коллекторы дымовых газов;  
4 – размораживающее устройство; 5 – растопочная труба.

Рис. 1.8. Размораживающее устройство Гипрококса

Газы получают в специальной топке, расположенной рядом с размораживающим устройством. Они отсасываются дымососом производительностью 60000 м<sup>3</sup>/ч и напором 140 мм вод. ст. и направляются в размораживающее устройство. Газы распределяют по трубам, расположенным вдоль стен размораживающего устройства, через небольшие патрубки (сопла), установленные через каждые 2 м. В помещении предусмотрен дренаж для удаления воды, вытекающей из вагонов при таянии льда.

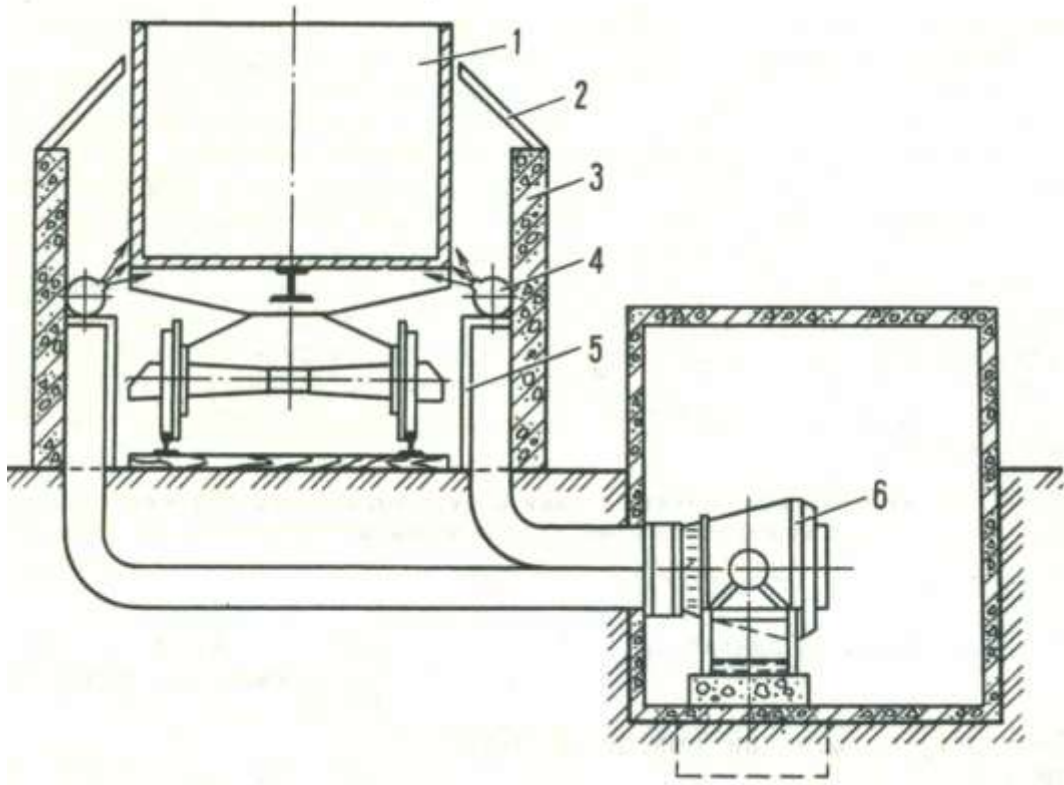
Для снижения температуры газов к ним подмешивается атмосферный воздух. Температура смеси при входе в размораживающее устройство не превышает 200 °С, при выходе 80 °С. Такие устройства для разогрева вагонов запроектированы Гипрококсом трех стандартных размеров для одновременного разогрева 5, 10 и 20 вагонов. Размораживающие устройства данного типа работают на ряде коксохимических заводов Донбасса и Урала.

На основании многолетних наблюдений установлено, что при начальной температуре газов 120 ÷ 140 °С длительность разогрева вагонов грузоподъемностью 60 тонн составляет 2,5 ÷ 3 часа. Необходимо отметить, что принятая в проекте размораживающее устройство Гипрококса температура газов 200 °С оказалась слишком высокой. При такой температуре повреждаются детали тормозной системы вагонов и окраска бортов. Наблюдались случаи выхода из строя подшипников вследствие разжижения и вытекания смазки. Для предотвращения подобных явлений были опробованы следующие мероприятия:

- снятие наиболее подверженных порче деталей вагонов с последующей установкой их на место после окончания разогрева;
- защита деталей от нагрева орошением их водой, для этого устанавливали специальные оросительные устройства подающие воду на детали вагона в течение всего времени его пребывания в размораживающем устройстве;
- защита термочувствительных деталей мешками с опилками, брезентовыми фартуками.

Все эти мероприятия оказались очень трудоемкими и не обеспечивали полной сохранности деталей вагонов. Поэтому от их применения отказались, а начальную температуру газов снизили до 100 °С. При этом повреждение деталей вагонов было исключено, однако длительность разогрева увеличилась в 2 ÷ 3 раза.

Стремление интенсифицировать процесс разогрева вагонов со смерзшимся углем привело к появлению размораживающих устройств, в которых теплоносителем являются выхлопные газы реактивных авиационных двигателей, отработавших свой летный моторесурс (рис. 1.9).



1 – полувагон; 2 – козырек; 3 – пенобетонные плиты; 4 – трубопровод; 5 – опоры; 6 – авиационный двигатель.

Рис. 1.9. Разогрев вагонов с помощью авиационных двигателей

Сооружены они на восьми отечественных ТЭС, причем на их создание уходил обычно один месяц [22]. Размораживающее устройство представляет собой полутоннельный гараж, расположенный на расстоянии 4 ÷ 5 метров от вагоноопрокидывателя. Это обеспечивает работу размораживающего устройства и ваго-



ноопрокидывателя в едином технологическом цикле. Стены 3 размораживающего устройства выполняются из железобетонных или армопенобетонных плит высотой  $1 \div 2$  метра. Вдоль стен на скользящих опорах прокладывается напорный трубопровод диаметром 325 мм с щелью  $8 \div 10$  мм. Козырек 4 изготавливается из листовой стали с теплоизоляцией и находится на уровне верхнего обвязочного пояса вагона или доходит до середины высоты кузова (Трипольская ГРЭС).

Применяются авиационные двигатели трех типов: ВК-1, РД-9 и АИ-20. Последний имеет расход топлива в 1,5 раза выше, чем у остальных и характеризуется относительно тяжелым запуском.

На ряде ТЭС двигатели работают со снятыми турбинами, а вращение компрессора осуществляется электродвигателем мощностью  $125 \div 160$  кВт. Опыт эксплуатации показал, что это не приводит к увеличению срока службы двигателей, который не превышает  $1000 \div 1500$  часов. Расход же электроэнергии составляет значительную величину. Поэтому снимать турбину не рекомендуется.

Как показали испытания на Троицкой ГРЭС, средняя скорость разогрева тормозного цилиндра составила  $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ . За  $25 \div 30$  мин разогрева в размораживающее устройство температура тормозного цилиндра не превышает  $30^\circ\text{C}$ .

Увеличение вместимости размораживающего устройства нерационально вследствие трудностей с надвигом вагонов. Установка размораживающего устройства отдельно от вагоноопрокидывателя (тупиковый вариант) лишает его каких-либо преимуществ по сравнению с ранее рассмотренными размораживающими устройствами. Поэтому размораживающее устройство с авиационными двигателями оказались эффективными на тех ТЭС, где поступающий уголь обладает относительно небольшой степенью смерзаемости. В качестве примера можно привести Троицкую ГРЭС, на которой Экибастузский уголь не примерзает; а «прихватывается» к стенкам и люкам вагонов. В то же время на Рефтинской ГРЭС, сжигающей тот же уголь, но расположенной севернее и в 1,5 раза дальше от поставщика угля, мощность теплового потока оказалась недостаточной. Пришлось в каждой секции устанавливать по два авиационных двигателя.

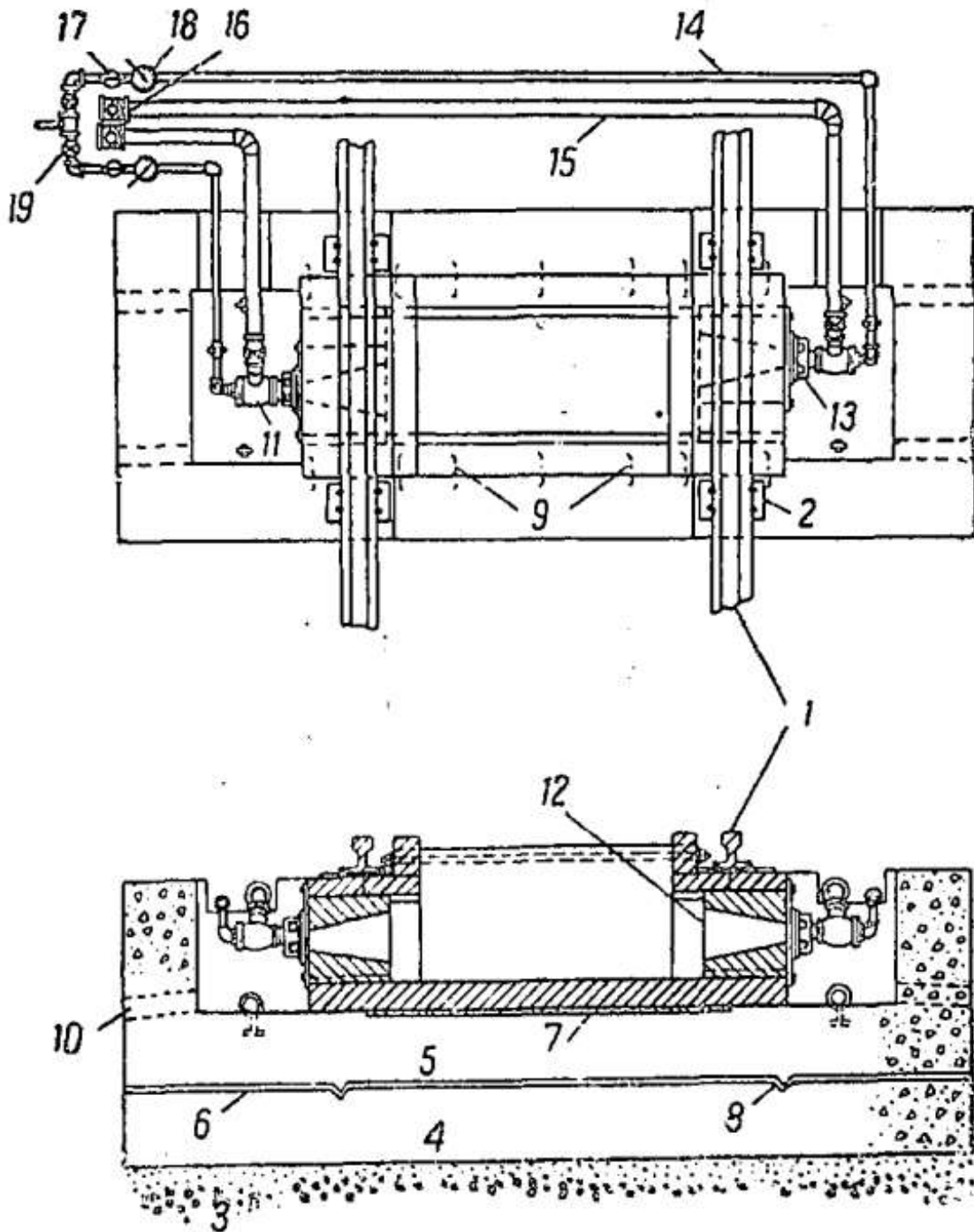
Увеличить плотность теплового потока повышением температуры циркулирующих в размораживающем устройстве газов или воздуха затруднительно из-за возможного повреждения деталей тормозного оборудования вагонов. Имеется еще одно отрицательное свойство размораживающих устройств с авиационными двигателями: загазованность воздуха выхлопными газами.

В зарубежной практике применяются различные способы разогрева смерзшегося груза в полувагонах перед разгрузкой. Один из самых дешёвых способов - разогрев водой. Он применялся в 40 годах в Швеции для выгрузки слабо смерзшейся руды. В вагоны с грузом накачивалась морская вода, после чего их некоторое время выдерживали в таком состоянии, затем воду сливали и приступали к разгрузке. Недостатки данного способа следующие: невозможно разогревать сильно смерзшийся груз, разгруженный груз необходимо сразу применять в употребление иначе он смерзнется в штабелях, вода уносит с собой мелкие частички груза, необходимо предохранять тормозное оборудование вагонов от попадания воды [92].

В США в 1950 году применялся разогрев вагонов с углем при помощи паровых пик. В наклонных стенках специальных вагонов выполнены вырезы, куда вставляются пики, имеющие по своей длине небольшие вырезы. В результате пар поступает непосредственно в массу смерзшегося топлива. Аналогичный способ разогрева использовался для разогрева руды в порту Свартон (Швеция).

Еще одно устройство для разогрева угля показано на рисунке 1.10, которое представляет собой открытую яму, выложенную огнеупорным кирпичом и размещенную между железнодорожными путями. В стенках ямы устанавливают мазутные форсунки, процесс горения топлива в которых регулируется таким образом, чтобы пламя не касалось деталей вагонов. Передача тепла стенкам вагона осуществляется конвекцией при обтекании стенок газами, а также радиацией от факела и раскаленных стенок обмуровки ямы. При умеренно холодной погоде и малой глубине промерзания топлива разогрев слоя топлива толщиной  $10 \div 15$  мм происходит за 20 мин. При этом на разогрев одного вагона расходуется  $38 \div$

45 литров мазута. Более длительное пребывание вагонов над ямой опасно, так как могут быть повреждены детали тормозного оборудования [92].



1- рельс; 2 - подкладка; 3 - песчаное ложе; 4 - бетон; 5 -бетонная балка; 6 - песчаная прослойка; 7 - песок под кирпичной кладкой; 8 - V - образное углубление; 9 - связывающие цементные шпалы; 10 - отверстие для стока; 11 - нефтяная горелка; 12 - камера сгорания; 13 - воздушный регистр; 14 - нефтепровод; 15 - труба от главного нефтепровода; 16 - воздушный клапан; 17 - нефтяной фильтр; 18 - нефтяной микрофильтр; 19 - клапан выключения

Рис.1.10. Схема канавы для оттаивания угля на ст. Рочестер, США.

При всей простоте описанный способ разогрева вагонов имеет следующие недостатки:

- опасность повреждения деталей вагонов (шлангов тормозной системы, подшипников и др.);
- этот способ совершенно неприменим для вагонов с деревянными стенками;
- неэффективное использование тепла сгоревшего топлива, большая часть которого теряется;
- недостаточная эффективность при сильных морозах, по условиям малой длительности пребывания вагонов над ямами размораживаться может только небольшой слой топлива, что не исключает полностью затруднений, особенно при выгрузке топлива через люки.

В порту Толедо (США) была смонтирована установка другого типа. Участок пути длиной 7 вагонов, ведущий к вагоноопрокидывателю, оградили металлическими стенами, а между рельсами установили 56 нефтяных нагревателей, получивших название "Hot dogs". Участок пути длиной три вагона оборудовали боковыми подогревателями того же типа. Сам нагреватель представляет собой перфорированную трубу диаметром 152 мм и длиной 1830 мм, внутри которой укреплена нефтяная форсунка. Труба изготовлена из сплава 22-24 % хрома и 12-15 % никеля, что делает её устойчивой к высоким температурам и окислению. В нагревателях сжигается легкая нефть распыляемая воздухом под давлением. Труба раскаляется и её поверхность отдает тепло стенкам вагона за счет излучения. При этом продукты сгорания, выходящие из отверстий на поверхность трубы и из торцевого конца, передают тепло за счет конвекции [92].

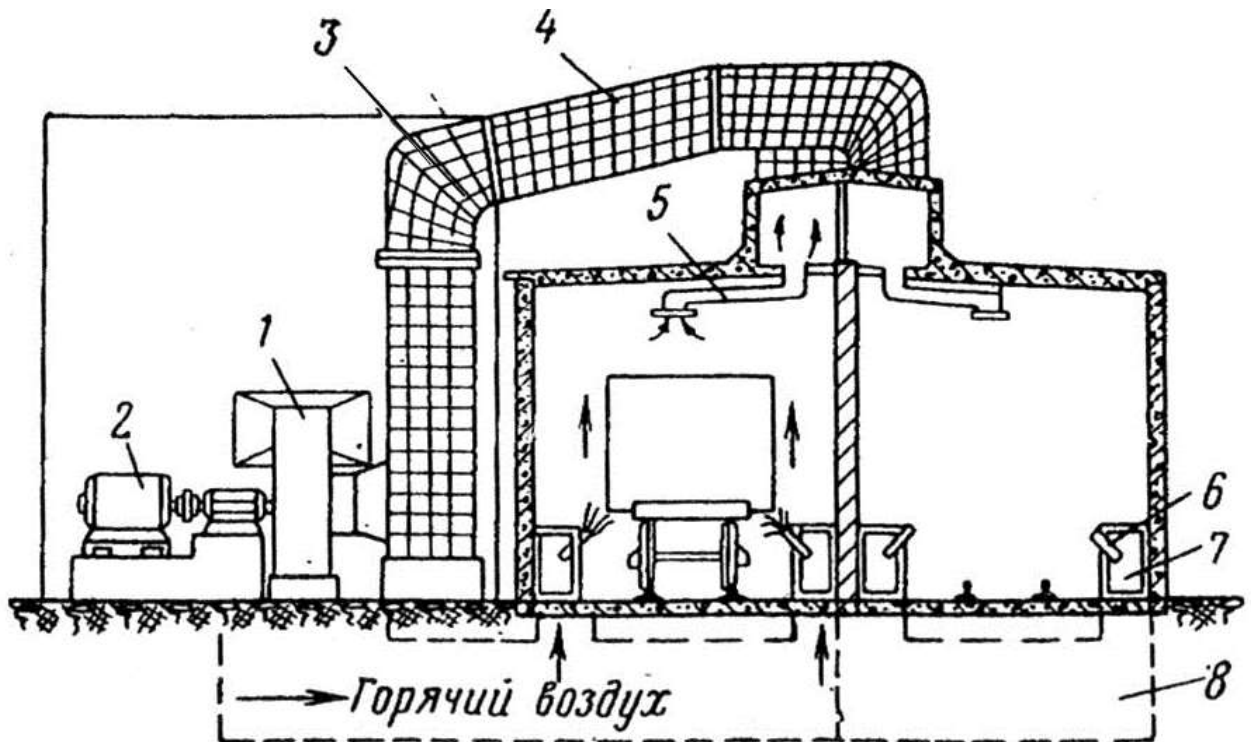
Существенный недостаток всех рассмотренных выше способов разогрева заключается в больших потерях тепла в окружающую среду, что делает эти способы малоэкономичными и неприемлемыми при больших объемах разгружаемого топлива. В связи с этим разогрев вагонов стали производить в специальных отапливаемых помещениях - размораживающих устройствах.

Для разогрева вагонов со смерзшимся топливом наибольшее распространение получили размораживающие устройства трех типов [34]:

- конвективного типа, где тепло передается за счет воздействия струй горячего рабочего тела, в основном воздуха, к элементам вагона;
- радиационного типа, где разогрев осуществляется за счет переноса тепла от излучательных элементов (газовых или электрических) за счет лучистой составляющей;
- радиационно-конвективного типа, сочетающие одновременно перенос тепла за счет излучения от разогретых экранов (в основном с паром) и за счет воздействия струй горячего воздуха.

## 1.2. Конвективные размораживающие устройства

Наибольшее распространение в промышленной энергетике получили конвективные размораживающие устройства, в которых теплоносителем является горячий воздух, нагреваемый в паровых калориферах до  $100 \div 120 \text{ } ^\circ\text{C}$ , рис. 1.11.



1 - вентилятор; 2 - электродвигатель; 3 - калорифер; 4 - короб рециркуляции; 5 - воздуховод рециркуляции; 6 - нагнетательные патрубки; 7 - нагнетательный короб; 8 - нагнетательная шахта.

Рис. 1.11. Размораживающее устройство конвективного типа (проект Теплопроекта)

Сооружаются размораживающее устройство по типовому проекту, разработанному Харьковским отделением института Теплоэлектропроект. Устройство состоит из машинного отделения и нескольких самостоятельных секций. В машинном отделении установлены калориферы, вентиляторы и щит управления. Вентиляторы забирают воздух из верхней части размораживающее устройство и подают его в калориферы и затем в распределительные короба, расположенные по обе стороны железнодорожного пути. Из коробов воздух выходит через сопла и направляется на стенки вагонов. В настоящее время такие устройства для разогрева вагонов эксплуатируются более чем на 20 тепловых электростанциях.

На Артемовской ТЭЦ и Владивостокской ТЭЦ-2, расположенных на юге Приморского края, установлено аналогичное размораживающее устройство. Размораживающее устройство Артемовской ТЭЦ имеет протяжённость 144 метра и вмещает в себя по 10 вагонов в каждый гараж (всего 2 гаража). Полная высота размораживающее устройство составляет 10,5 метров. Ширина двух сараев – 12 метров. Толщина наружной стенки размораживающего устройства составляет 400 мм. Для обеспечения подачи воздуха используется 4 вентилятора типа ВД-20 мощностью 315 кВт каждый.

Размораживающее устройство Владивостокской ТЭЦ-2 имеет протяжённость 129 метров и вмещает в себя по 8 вагонов в каждый гараж (всего 2 гаража). Общий вид внутри размораживающего устройства конвективного типа приведен на рис. 1.12.

В нижней части с двух сторон расположены короба для подвода воздуха (рис.1.12. поз.1). Горячий воздух через сопла (рис.1.12. поз.2) подается на разогрев вагона, а затем через воздушные короба в верхней части (рис.1.12. поз.3) забирается на вход в вентилятор. Скорость воздуха на выходе из сопел около 10 м/с.

Для подачи воздуха используются вентиляторы типа ВД-20 (рис.1.13), по одному вентилятору на каждую секцию. Вентилятор забирает 85 % воздуха из размораживающего устройства и 15 % наружного воздуха.



1 – воздушный короб; 2 – воздушные сопла; 3 - короб рециркуляции воздуха

Рис. 1.12. Размораживающее устройство конвективного типа Владивостокской ТЭЦ-2

Для организации дутья установлено два вентиляторов общей мощностью 640 кВт. Для подогрева воздуха используют паровые калориферы. Температура воздуха после прохода через калориферы находится в диапазоне от 70 до 95 °С, в зависимости от температуры наружного воздуха. Длительность разогрева вагонов при разгрузке вагоноопрокидывателями и при температуре воздуха минус 15 °С составляет 2,5 ÷ 3,0 часа.





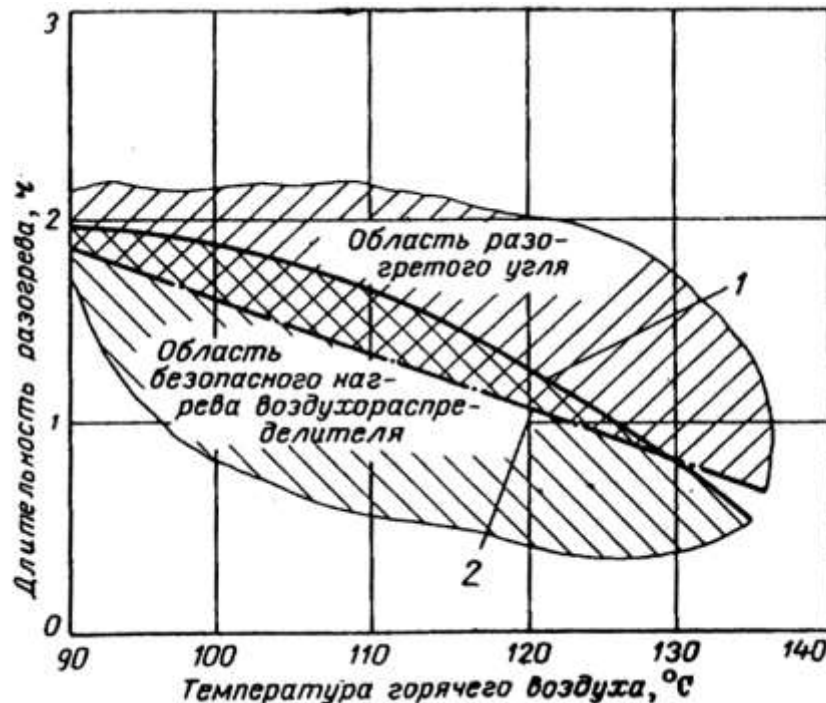
Рис. 1.13. Вентилятор для создания дутья в размораживающее устройство Владивостокской ТЭЦ-2

Испытания размораживающих устройств комбинированного типа показали, что длительность разогрева можно существенно снизить. Для этого рекомендуется увеличить температуру воздуха до 120 °С, скорость выхода его из сопл до 20 м/с; сопла следует установить под углом, при котором 40 % воздуха подается под люки вагонов и 60 % на борта. При этом температура деталей тормозной системы не поднимется выше 45 °С. На графике (см. рис. 1.14), составленном по данным испытаний, видно, что с увеличением температуры циркулирующего воздуха со 100 до 120 °С длительность разогрева вагонов уменьшается в 1,5 раза, а детали воздухораспределителя вагонов не достигают опасной для них температуры нагрева.

При разработке и внедрении размораживающих устройств этого типа приходится учитывать две противоречащие друг другу тенденции: стремление ускорить процесс разогрева, для чего необходимо увеличивать температуру го-



рячего воздуха, и требование обеспечить сохранность вагонного парка, для чего необходимо снижать температуру горячего воздуха или принимать специальные меры защиты термоопасных деталей вагонов.



1 – предельная (плюс 45 °C) температура воздухоораспределителя; 2 - температура АШ в слое на расстоянии 25 мм от деревянной стенки (равна плюс 1 °C).

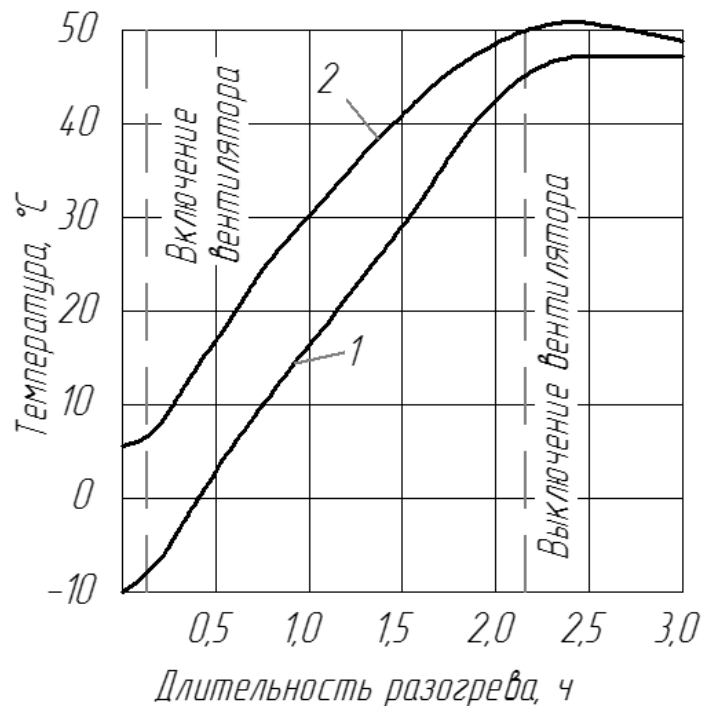
Рис. 1.14. Изменение температуры угля и воздухоораспределителя вагона в зависимости от температуры воздуха

На коксохимических заводах размораживание вагонов с углем производят продуктами горения газов в специальных топках [39]. Температура продуктов сгорания на входе в размораживающее устройство около 150 °C. Защиту тормозного оборудования от высоких температур производят путем его орошения или создания водяных завес. При этом не исключена возможность попадания воды в тормозные устройства, что недопустимо.

Основное назначение размораживающих устройств в энергетике - обеспечение своевременной разгрузки вагонов без их последующей зачистки. В идеальном варианте при расположении размораживающего устройства непосредственно перед вагоноопрокидывателем достаточным является так называемый, пленочный разогрев, то есть оттаивание тонкого слоя (пленки) угля у стенок и люков ва-

гона. В связи с тем, что размораживающее устройство располагается на расстоянии от вагонопрокидывателя (тупиковый вариант) и после разогрева вагонов требуется время на маневровые работы и разгрузку угля, глубину разогрева необходимо увеличивать до  $20 \div 30$  мм. Для размещения размораживающих устройств перед вагонопрокидывателями необходимо, чтобы одна секция размораживающего устройства обеспечивала номинальную производительность вагонопрокидывателя и обеспечивала возможность быстрого отключения для безопасного прохождения тепловозов через размораживающее устройство во время надвига вагонов на вагонопрокидыватель, что недостижимо для размораживающих устройств конвективного типа.

Опыт наладки размораживающих устройств показал, что можно добиться необходимой глубины разогрева угля, не применяя защитных мер. На рисунке 1.15 приведены кривые разогрева тормозного цилиндра в размораживающем устройстве Старобешевской и Кировской ГРЭС2. Испытания позволили установить, что именно у тормозного цилиндра температура растет быстрее, чем у остальных деталей автотормозного оборудования.



1 - Старобешевская ГРЭС; 2 – Кировская ГРЭС

Рис. 1.15. Разогрев тормозного цилиндра в размораживающее устройство на ТЭС

На Старобешевской ГРЭС температура горячего воздуха у выхода из нагнетательных патрубков составляла 100 °С и скорость разогрева тормозного цилиндра достигла 0,45 °С/мин, на Кировской ГРЭС при  $t_{г.в} = 80$  °С скорость разогрева меньше - 0,37 °С/мин. Тем не менее через 2 ч разогрева тормозной цилиндр на Кировской ГРЭС достиг предельно допустимой температуры 55 °С из-за своей высокой начальной температуры. Поэтому в размораживающем устройстве необходимо учитывать исходное состояние тормозного оборудования, зависящее от пребывания вагонов в размораживающее устройство без разогрева. Составлявшаяся ранее режимная карта работы размораживающего устройства предусматривала регулирование давления пара в калориферах для изменения температуры горячего воздуха в зависимости от наружной температуры.

Более простым и к тому же более надежным способом обеспечения сохранности вагонов является отключение дутьевых вентиляторов через определенное время, в зависимости от наружной температуры. При этом температура горячего воздуха и, следовательно, тепловой режим размораживающего устройства сохраняются постоянными.

Основными достоинствами конвективных размораживающих устройств являются их широкое распространение и относительная простота. К недостаткам относятся: слабая интенсивность разогрева угля, так как максимальная плотность теплового потока составляет около 500 ккал/(ч·м<sup>2</sup>); металлоемкость и необходимость расходовать пар в холостом режиме - для поддержания размораживающего устройства в горячем состоянии.

За рубежом конвективные размораживающие устройства нашли широкое применение. Первые конвективные размораживающие устройства в США появились в 1933-1935 годах. На коксохимическом заводе компании "Donner-Hanna Coke" в Буффало было построено кирпичное размораживающее устройство с двумя камерами разогрева, вмещающим в общей сложности 16 вагонов с углем (рис 1.16). Для разогрева использовался воздух, нагреваемый отапливаемыми коксовым газом трубчатыми печами, которые установлены на втором этаже.

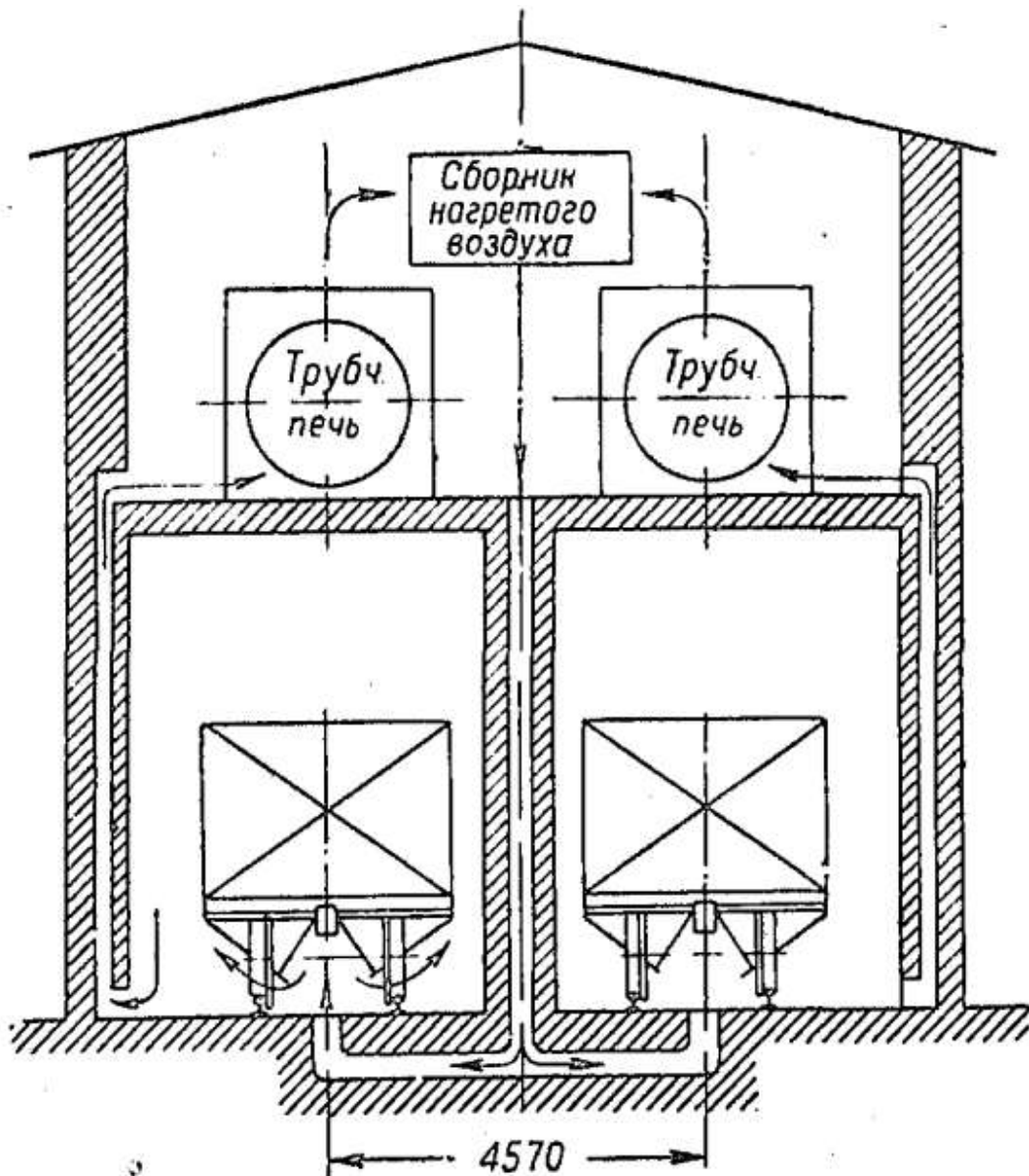


Рис. 1.16. Размораживающее устройство на заводе компании "Donner-Hanna Coke" в Буффало

Горячий воздух попадает в камеры разогрева через каналы, имеющие выходы между рельсами, и омывает сначала днище вагонов, где уголь смерзается наиболее сильно, а затем их боковые и торцевые стенки. Затем воздух выходит из камеры через каналы, сделанные в стенах, и направляется к печам [92]. Похожая конструкция использовалась в Нью-Йоркском порту.

### 1.3. Радиационный метод разогрева вагонов

Увеличить плотность теплового потока повышением температуры циркулирующих в размораживающем устройстве газов или воздуха затруднительно, из-за

возможного повреждения деталей тормозного оборудования вагонов. Увеличение количества циркулирующего воздуха дает слишком малый эффект, так как коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке увеличивается в меньшей степени, чем возрастает расход энергии на увеличение циркуляции воздуха. Радиационный метод разогрева вагонов со сжатым углем имеет следующие отличительные особенности:

- направленность теплового воздействия;
- высокую плотность теплового потока - до  $10 \div 12$  тыс. ккал/(ч·м<sup>2</sup>);
- расход энергоресурсов только в период разогрева вагонов.

В России и бывшем СССР широкое распространение получили размораживающие устройства с радиационным способом передачи тепла. В качестве источников радиационного воздействия могут применяться газовые излучатели или электрические нагреватели. В опытно-промышленной установке на Приднепровской ГРЭС были применены газовые излучатели. Установка представляла собой размораживающее устройство вместимостью восемь четырехосных вагонов. Первоначально была сделана попытка вдвигать панели с газовыми горелками под днище вагонов. Такая конструкция эксплуатируется на Ново-Тульском металлургическом заводе. Ненадежность и нетехнологичность подвижной конструкции обусловили переход в дальнейшем на проходной тип размораживающего устройства, когда все излучающие панели были расположены вне железнодорожного габарита.

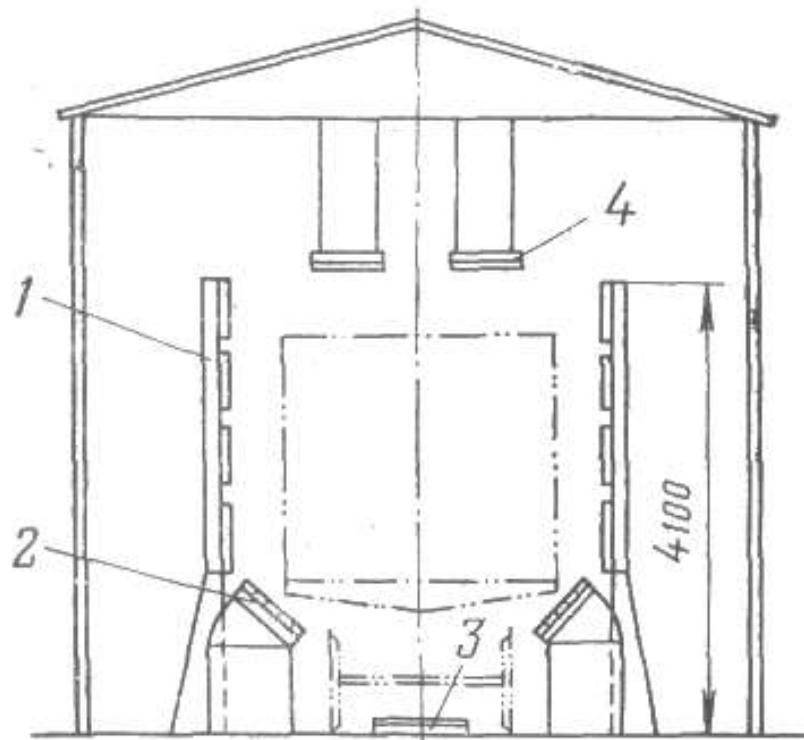
Испытания размораживающих устройств показали достаточно высокую тепловыделяющую способность газовых излучателей, но выявили ряд конструктивных недоработок:

- длина наклонных панелей оказалась завышенной, что приводило к перегреву тормозного оборудования и деревянного кузова вагона;
- надежность работы газовых горелок оказалась недостаточной;
- система зажигания горелок несовершенна и требует обязательного контроля их горения.

Первое в СССР опытное размораживающее устройство с электрическими нагревателями было испытано на Южно-Кузбасской ГРЭС. Примененные в нем плиточные электронагреватели оказались ненадежными: 80% из них вышло из строя во время испытаний.

Работы по изучению процесса разогрева угля радиационным способом, выполненные в Ленинградском отделении института Теплоэлектропроект, позволили выявить рациональный тип опытных размораживающих устройств с электрическими излучателями.

Следующая экспериментальная установка с электронагревателями была сооружена на Томь-Усинской ГРЭС, оборудованной вагоноопрокидывателями. В качестве излучателей были применены трубчатые электронагреватели, оказавшиеся достаточно надежными: за время испытаний вышел из строя всего один электронагреватель из двух тысяч. Экспериментальная установка (см. рис. 1.17) была рассчитана на один вагон грузоподъемностью 93 т и расположена в здании разгрузочного сарая.



1, 2, 3, 4 — вертикальные, наклонные, горизонтальные и верхние панели.

Рис. 1.17. Экспериментальное размораживающее устройство с трубчатыми электронагревателями на Томь-Усинской ГРЭС

Маневровые работы для подачи разогретого вагона на разгрузку требовали в среднем 0,5 часа. Вертикальные панели состояли из четырех рядов № 1 - 4 низкотемпературных электронагревателей мощностью по 1,8 кВт; наклонные панели № 5 - 9 — из пяти рядов высокотемпературных нагревателей мощностью по 3,2 кВт; горизонтальные панели - из двух рядов низкотемпературных электронагревателей мощностью по 1,55 кВт. Высокотемпературные электронагреватели имели температуру поверхности  $700 \div 750^{\circ}\text{C}$ , низкотемпературные –  $500 \div 550^{\circ}\text{C}$ . Общая мощность установки 4070 кВт при напряжении 220 В переменного тока.

Первые опыты по разогреву вагонов со смерзшимся углем показали, что ряды № 2 - 4 вертикальных и ряды № 5 - 6 наклонных панелей перегревают и деревянный, и металлический борт вагона, а горизонтальные панели перегревают тормозное оборудование. В то же время торцевые стенки вагона не подвержены тепловому воздействию, на них даже снег не таял за  $20 \div 30$  мин пребывания вагона в размораживающем устройстве. Поэтому упомянутые ряды электронагревателей были отключены, а часть из них была использована для верхних панелей, предназначенных для разогрева торцевых стенок вагона и корки смерзшегося - сверху угля. Для этой же цели был оставлен и включался ряд № 1 вертикальных панелей, расположенный выше кузова вагона. Во время проведения испытаний средняя мощность установки составила 1400 кВт. При этом скорость разогрева тормозного цилиндра оказалось равной  $2,16^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . Это означает, что критическая температура тормозного цилиндра  $50^{\circ}\text{C}$  могла наступить не раньше чем через  $20 \div 25$  мин. Расположения экспериментальной установки осуществлялось вдали от вагоноопрокидывателей, в результате разогрев угля приходилось осуществлять с запасом во избежание повторного его примерзания во время маневровых работ. Резерв по мощности находился в пределах  $30 \div 40\%$ . Это означает, что потребная мощность на один вагон составила примерно 1000 кВт, то есть согласуется с зарубежными аналогами.

Испытания подтвердили такое ценное качество применения трубчатых электронагревателей, как их безынерционность. Установка выходила на рабочий

режим через 3 минуты после ее включения, а мощность теплового потока через 3 минуты после отключения составляла всего 30% от номинальной. Однако испытания выявили и ряд недостатков. В частности, гарантированный срок службы высокотемпературных электронагревателей, равный 3000 часов, оказался недостаточным. Конструкция панелей не продумана с эксплуатационной точки зрения, не учтены все требования техники безопасности, не решены вопросы очистки излучателей и всей установки от пыли и кусочков просыпавшегося угля.

В настоящее время наибольшее распространение получили размораживающие устройства типа "Инфрасиб", разработанные АО "Сибтехэнерго". На Дальнем Востоке такие размораживающие устройства установлены на следующих предприятиях: Нерюнгринская ГРЭС, Южно-Сахалинская ТЭЦ, Сахалинская ГРЭС, Амурская ТЭЦ, Омские ТЭЦ-4, ТЭЦ-5, Харанорская ГРЭС, Читинская ТЭЦ-1, Приморская ГРЭС, Бийская ТЭЦ-1, угольный терминал АО "Порт Восточный". На Приморской ГРЭС в 2001 году введен в эксплуатацию размораживающее устройство радиационного типа, изображённый на рисунке 1.18.



Рис. 1.18. Общий вид нагревательных элементов размораживающее устройство "Инфрасиб"



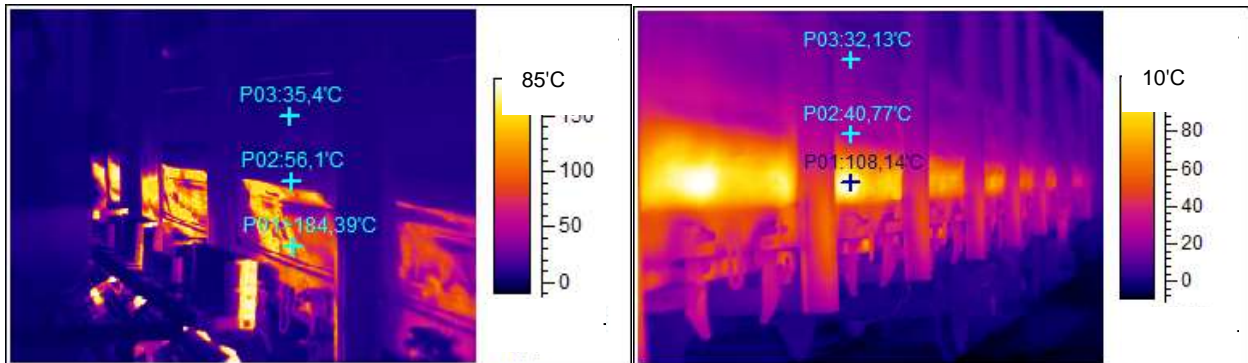
Установка была создана в АО "Сибтехэнерго", тепловой расчет электронагревательных элементов произведен СКВ Объединения "Сибэлектротерм". Размораживающее устройство, получившее наименование "Инфрасиб", сооружается в примыкании к зданию вагоноопрокидывателя и представляет собой полутоннельный гараж общей длиной 60 м, в котором расположены 216 нагревателей по 108 с каждой стороны в две нитки. Потребляемая мощность - 1,49 МВт. Тип размораживающего устройства - проходной, радиационный, полутоннельный. На Приморской ГРЭС впервые применена технология монтажа нагревателей на кривых участках железнодорожного пути (рис. 1.19).



Рис. 1.19. Сопряжение размораживающее устройство "Инфрасиб" с вагоноопрокидывателем

Применение электрических нагревателей требует контроля над тепловым состоянием узлов вагона. На рисунке 1.20а показана термограмма, выполненная через 5 минут после включения электрических нагревателей [29]. Хорошо видно, что температура стенки превышает допустимую температуру, при этом воздействие излучателя локально и соседняя область практически не нагревается в процессе разогрева. После вывода вагонов из размораживающего устройства (рис.

1.20б) видно, что нижняя область вагона нагрелась до температуры  $108^{\circ}\text{C}$ , при допустимой температуре  $90^{\circ}\text{C}$ .



а) — через 5 минут после включения нагревателей

б) — после вывода вагонов из размораживающее устройство

Рис. 1.20. Термограмма нагрева вагона в радиационном размораживающее устройство, АО "Порт Восточный"

В США, Канаде и других зарубежных странах с целью уменьшения времени разогрева вагонов так же применяют радиационный способ разогрева. В порту Толедо (США) была смонтирована установка, оборудованная газовыми горелками инфракрасного излучения. В порту Ту-Харбора (США) была также введена в эксплуатацию установка, позволяющая разогревать смерзшуюся руду с помощью инфракрасных лучей до полного восстановления ее сыпучести. На агломерационной фабрике завода Онайтез Стайте Стил Корп в Янгстуне (США) введена в эксплуатацию установка для разогрева смерзшихся в железнодорожных вагонах угля, кокса, доломита, известняка и песка инфракрасными лучами [15].

В США, широкое применение получили размораживающие устройства с инфракрасными электронагревателями [6], которые используются в случае перевозки угля вагонами, как типа «хopper», так и типа «гондола». Установленная мощность электронагревателей колеблется от 1590 до 5115 кВт, производительность размораживающее устройство - от  $2 \div 3$  до  $15 \div 18$  вагонов в час.

Размораживающее устройство, разогревающее вагоны типа «гондола» (рис. 1.21), работают в одном технологическом цикле с вагоноопрокидывателями. Режим разогрева - переменный. Например, на ТЭС «Мартине Крик» (США) вагон

сначала попадает в зону, мощность излучателей в которой равна 1918 кВт, и получает в течение пяти минут мощное тепловое воздействие.

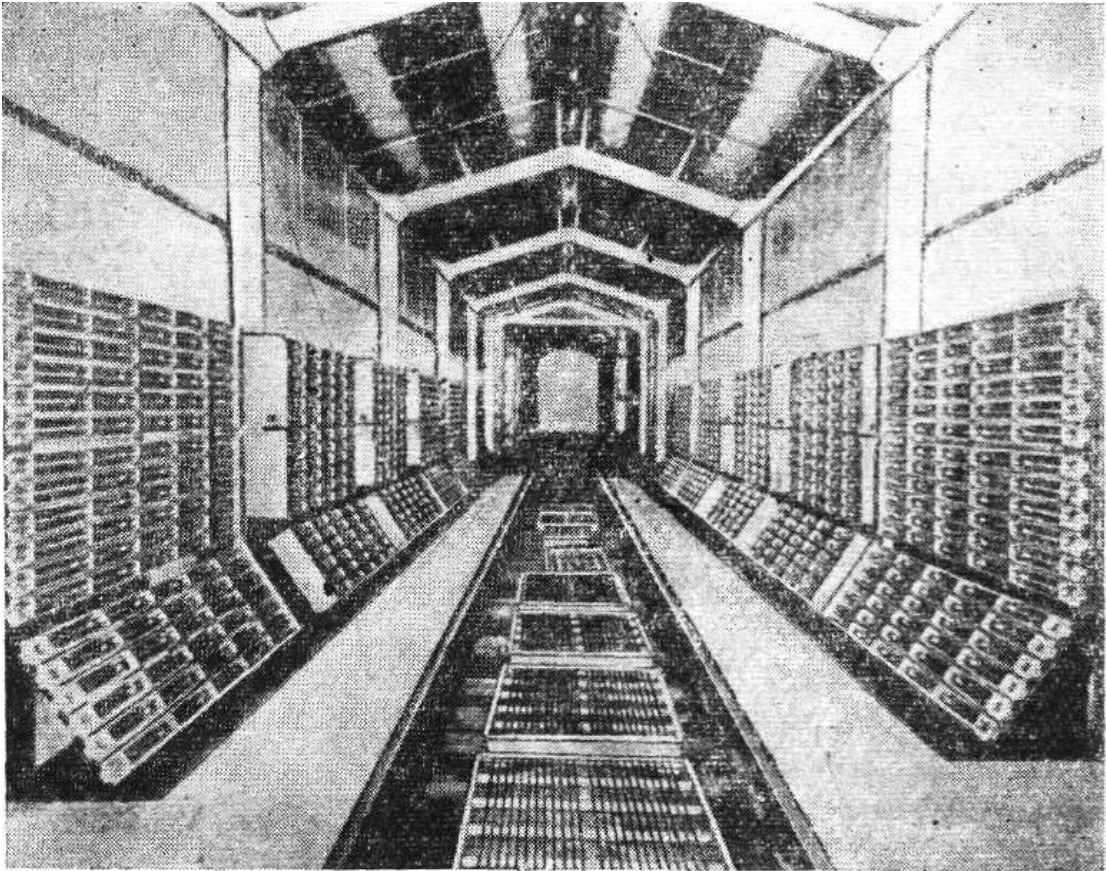


Рис. 1.21. Радиационный размораживающее устройство фирмы «Aitken Products, Inc»

Затем следующие пять минут он нагревается в зоне с излучателями мощностью 1015 кВт. В третьей зоне излучателей нет, и в течение пяти минут тепло от нагретых металлических деталей вагона передается углю. В результате каждые пять минут разогретый вагон подается на разгрузку. Интенсивность теплового воздействия может регулироваться от 0 до 100 % в зависимости от наружной температуры.

По данным компании Spectrum [1], занимающейся разработкой инфракрасных излучателей для разогрева вагонов с углем, применение газовых нагревателей может приводить к перегреву и возможному повреждению вагонов за счет сложного контроля над мощностью каждого излучателя (рис 1.22). При использовании электрических нагревателей увеличивается стоимость разогрева за счет использования более дорогого типа энергии.



Рис.1.22 Повреждению вагонов после разогрева в инфракрасных газовых нагревателях

#### 1.4. Размораживающее устройство с комбинированным подводом тепла

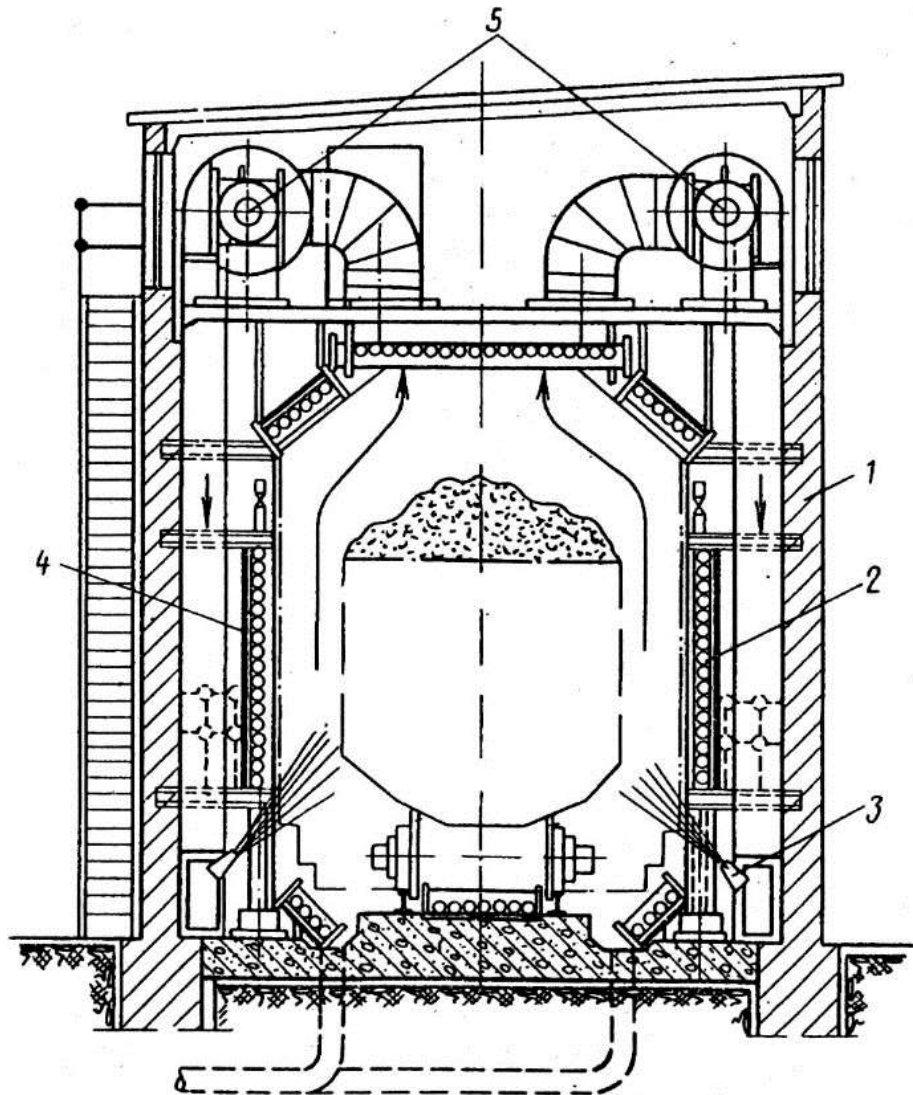
В организации "Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт" (далее ВТИ) детально изучался процесс разогрева слоя топлива радиационными источниками тепла [68], и непосредственно из опытов было найдено предельно допустимое значение плотности теплового потока, при котором происходит ускоренный разогрев слоя топлива, в то время как температура стенки не превышает  $90^{\circ}\text{C}$ . Для металлических стенок вагонов максимальная плотность теплового потока оказалась равной  $3000 \text{ ккал}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$ .

Такой тепловой поток можно создать излучателями, имеющими температуру излучающих поверхностей  $150 \div 200^{\circ}\text{C}$ . Для этого можно использовать трубы, обогреваемые паром с давлением  $10 \div 12 \text{ кгс}/\text{см}^2$ . На основании полученных данных было сконструировано размораживающее устройство новой конструкции [51] с комбинированным подводом тепла к стенкам вагона за счет излучения и конвекции. Кроме того, было предложено сооружать размораживающие устройства не тупикового типа, как это обычно делается, а проходные с непрерывным движением вагонов. При этом не тратится время на установку и удаление вагонов и размораживающее устройство меньше охлаждается при замене вагонов. Кроме того, при непрерывном движении вагонов в размораживающее устройство можно применить переменный режим разогрева: вначале более интенсивный с после-



дующим снижением. При таком разогреве можно иметь более интенсивный нагрев без перегрева деталей тормозного оборудования и бортов.

Размораживающее устройство конструкции ВТИ, изображенное на рисунке 1.23, представляет собой закрытый сарай с проложенной внутри железнодорожной колеей; по которой передвигаются разогреваемые вагоны.



1 – здание размораживающего устройства; 2 – трубчатые излучатели; 3 – сопла;  
4 – металлический экран; 5 – вентилятор.

Рис. 1.23. Размораживающее устройство для разогрева вагонов со смёрзшимся топливом конструкции ВТИ

По стенкам, на потолке и внизу между рельсами установлены излучатели из труб, обогреваемых паром. На перекрытии размораживающего устройства уста-

новлены вентиляторы, которые забирают воздух из верхней части размораживающего устройства и подают его в каналы, проходящие вдоль стен. Каналы имеют сопла, через которые воздух направляется на дно и стенки вагона. Размораживающее устройство разделено на отдельные независимые друг от друга секции (вмещающие один вагон) с самостоятельной системой циркуляции воздуха и подводом пара к излучающим панелям. Это позволяет иметь разные режимы разогрева в секциях, через которые последовательно, проходят вагоны. Таким образом, осуществляется переменный режим их разогрева.

Размораживающее устройство конструкций ВТИ было сооружено на Миrowsкой ГРЭС. Испытания показали, что длительность разогрева вагонов со смерзшимся углем в  $2 \div 2,5$  раза меньше, чем в размораживающем устройстве конвективного типа. При этом температура бортов вагонов и деталей тормозного оборудования остается в допустимых пределах.

Во время испытаний было установлено, что температура тормозного оборудования при включенных вентиляторах, растет очень быстро. Было рекомендовано включать вентиляторы только на короткое время, не больше одной четверти времени пребывания вагонов в размораживающее устройство. Если изменить место забора воздуха и забирать его не из верхней, а из более холодной нижней части, то длительность работы вентиляторов можно будет увеличить. При этом температура воздуха по высоте размораживающего устройства будет более равномерной и отстающие при нагреве детали (хребтовая балка, торцевые стенки и др.) будут разогреваться вместе с остальными частями вагонов.

Для ускорения разогрева вагонов в размораживающем устройстве необходимо создание специализированных вагонов, детали которых должны допускать нагрев выше  $100^{\circ}\text{C}$ , или должны быть предусмотрены меры для защиты наиболее ответственного оборудования от перегрева.

Для комбинированных размораживающих устройств тупиковый вариант не дает практически никаких преимуществ по сравнению с конвективными размораживающими устройствами. В случае установки комбинированного разморажи-

вающего устройства вплотную к вагоноопрокидывателю не удастся использовать существующие средства надвига вагонов - электротолкатели. Кроме того, у комбинированных размораживающих устройств сохраняется общий недостаток, присущий паровым размораживающим устройствам - необходимость поддерживать их в горячем состоянии весь холодный период года.

### **1.5 Цели и задачи исследования**

В результате выполненного анализа можно сделать выводы, что все существующие устройства для разогрева угля, используемые в данный момент, имеют ряд недостатков. Конвективные устройства имеют крайне низкие тепловые потоки и соответственно длительное время разогрева, радиационные устройства имеют очень высокие тепловые потоки и представляют опасность для деталей вагона за счет очень быстрого перегрева. Комбинированные устройства являются по своей сути радиационными устройствами с пониженными тепловыми потоками (так как включение дутья в этих размораживающих устройствах приводило к быстрому перегреву подшипников и тормозного оборудования).

На данный момент отсутствует методика расчета времени разогрева угля в размораживающем устройстве, поскольку сам процесс разогрева является очень сложным и зависит от многих факторов, в том числе и от конструкции размораживающего устройства. Единственная методика, позволяющая получить время разогрева для разных начальных условий, разработана для размораживающего устройства ВТИ. Соответственно она требует доработки для применения на размораживающем устройстве другой конструкции.

Целью 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 соответствии с целью работы были поставлены задачи:

1. Анализ и оценка современного состояния теории и практики существующих

ющих 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 противодействия и новой конструкции размораживающего устройства.

## **Глава 2. Реконструкция размораживающего устройства и экспериментальное исследование режимов его работы.**

### **2.1 Реконструкция размораживающих устройств угольного терминала АО "Восточный порт"**

В качестве объекта исследования выбраны размораживающие устройства угольного терминала АО "Восточный порт" (рис 2.1), как самого крупного порта в России [41] занимающегося перегрузкой угля из вагонов на морской транспорт. В 2012 году начато строительство третьей очереди (рис.2.2) угольного комплекса с планируемым вводом в эксплуатацию в 2020 году. Проект Третьей очереди предполагает строительство причала с двумя судопогрузочными машинами, станции разгрузки вагонов, оснащенной двумя тандемными вагоноопрокидывателями, четырех дополнительных угольных складов, оборудованных двумя стакерами и четырьмя реклаймерами. С вводом в эксплуатацию третьей очереди угольного комплекса в 2020 году годовая перевалка АО «Восточный Порт» возрастет до 39 млн тонн [97].





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

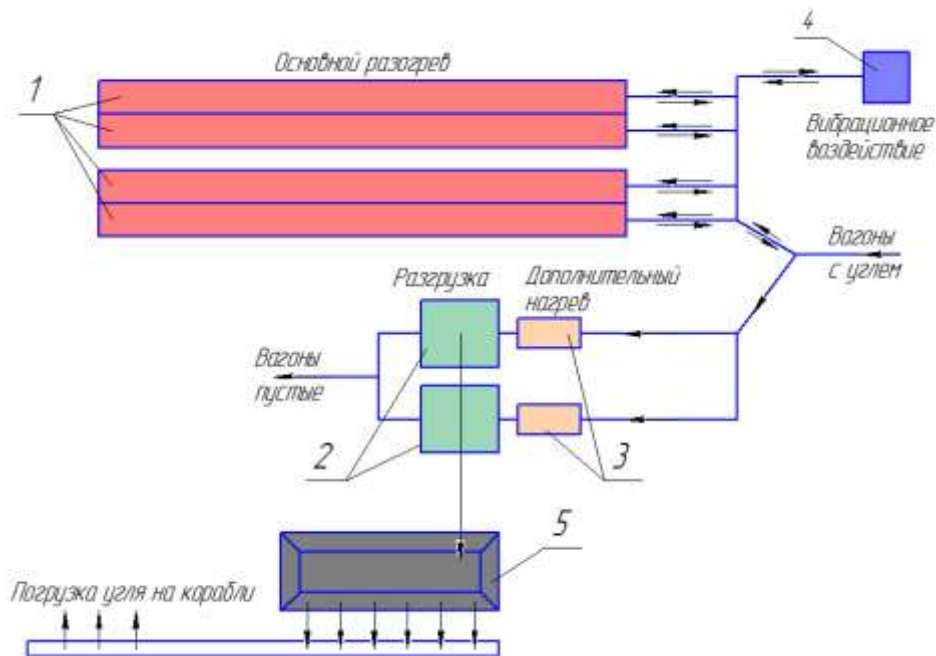
Рис. 2.1. Общий вид угольного терминала АО "Восточный порт"



Рис. 2.2. Третья очередь специализированного угольного производственно-перезгрузочного комплекса АО "Восточный порт"

Угольный терминал Восточного порта — это уникальный по своему техническому оснащению комплекс. Специализация терминала — перевалка каменного угля с использованием конвейерного оборудования. На комплексе хорошо отработана практика перевалки и хранения одновременно до 25 различных марок угля (в основном каменного угля Донецкого, Кузнецкого и Нерюнгринского месторождения). Технологические операции, связанные с разгрузкой угля из вагонов, требуют высокой надежности, поскольку через порт в течение года проходит более 22 миллионов тонн угля, что составляет в среднем около 42 вагонов в час. Технологическая схема разгрузки топлива (рис.2.3) состоит из следующих операций:

- a. маневровые работы для постановки полувагонов на разогрев
- b. разогрев топлива в размораживающих устройствах**
- c. маневровые работы для постановки полувагонов в вагоноопрокидыватель
- d. разгрузка вагонов в вагоноопрокидывателе
- e. маневровые работы по уходу вагонов с территории терминала



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

Рис. 2.3 Технологическая схема перегрузки топлива

В зимний период большую часть в технологической цепочке разгрузки топлива начинает играть разогрев угля (рис. 2.4).

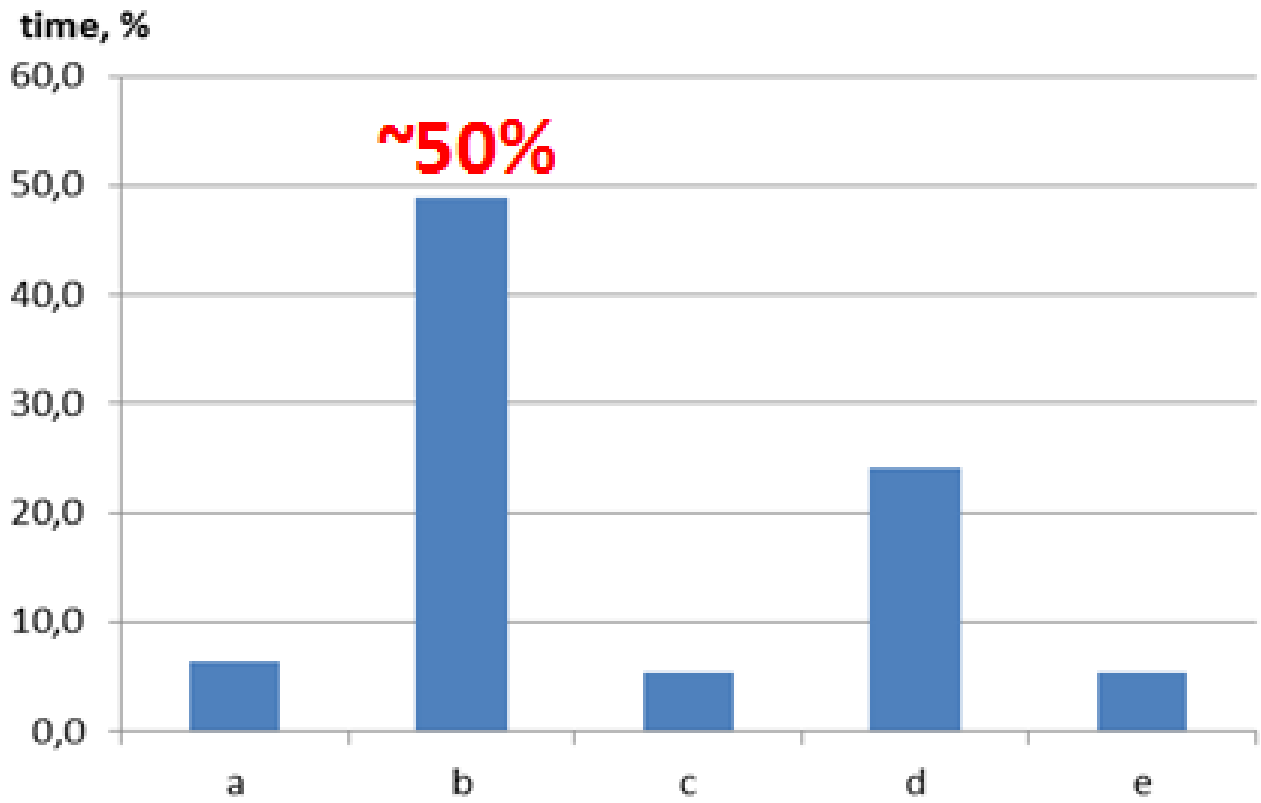
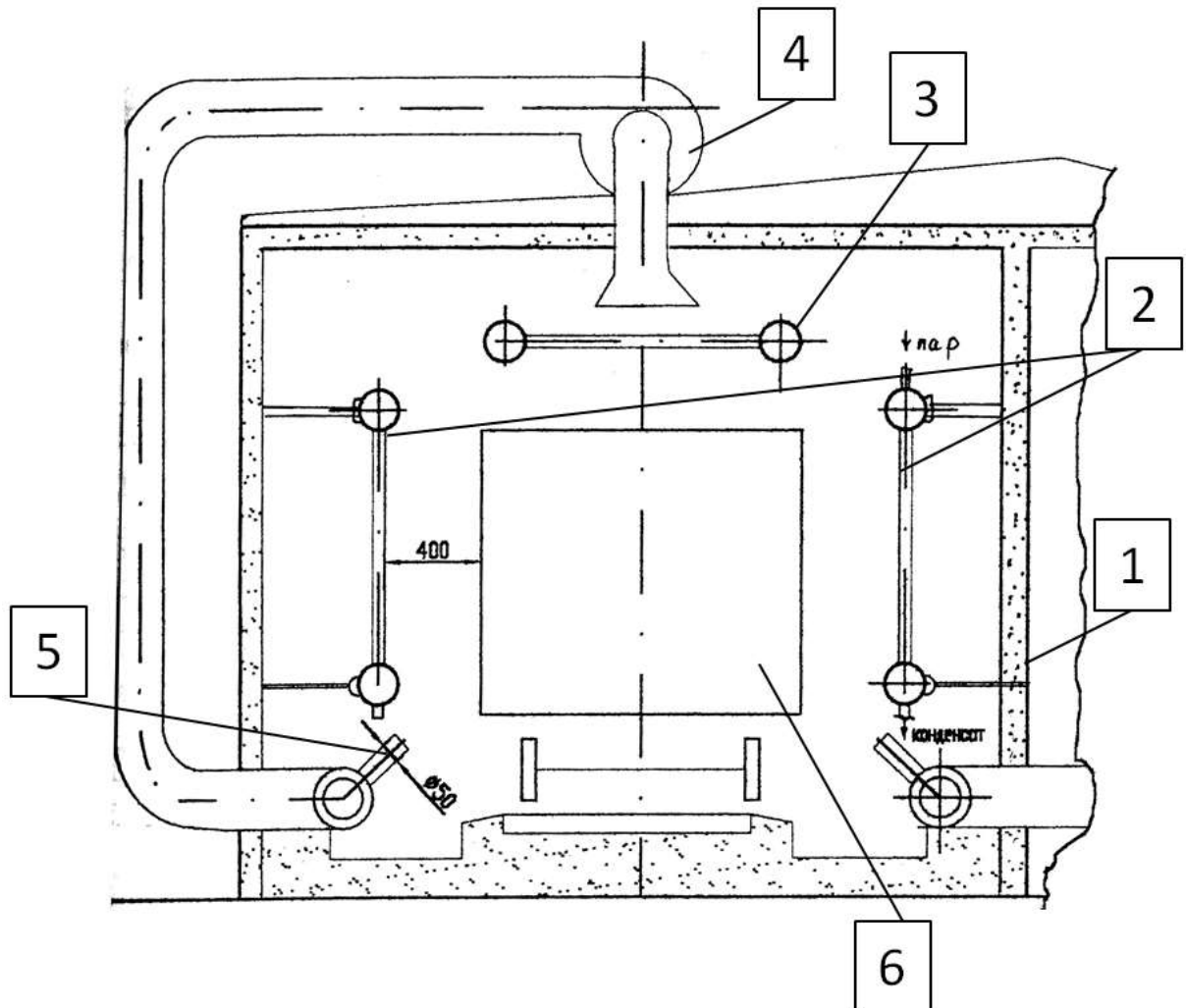


Рис. 2.4. Затраты времени на технологические операции

Затраты времени на разогрев угля в размораживающих устройствах составляют до 50 % от всего времени переработки партии [33]. В настоящее время для обеспечения разогрева угля на территории угольного комплекса АО «Восточный порт» расположено 4 размораживающих устройства радиационно-конвективного типа и 2 размораживающих устройства радиационного типа. Размораживающие устройства радиационно-конвективного типа предназначены для одновременного разогрева 20 вагонов каждый [26]. Размораживающие устройства радиационного типа предназначены для одновременного разогрева 4 вагонов.

Изначальная конструкция размораживающих устройств №1-4 радиационно-конвективного типа представляла собой бескаркасное, двухпролетное здание с несущими продольными стенками из бетона (рис.2.5, поз.1). Ширина одного пролёта 6 м, высота 5,2 м. Длина размораживающих устройств составляла 300 метров. Внутри помещения размораживающего устройства были размещены паровые

регистры, по одному на боковых стенах (поз.2) и на потолке (поз.3). Насыщенный пар от котельной угольного комплекса с давлением 0,8-1,0 МПа подавался к каждой секции от общего парового коллектора, расположенного на крыше размораживающего устройства.



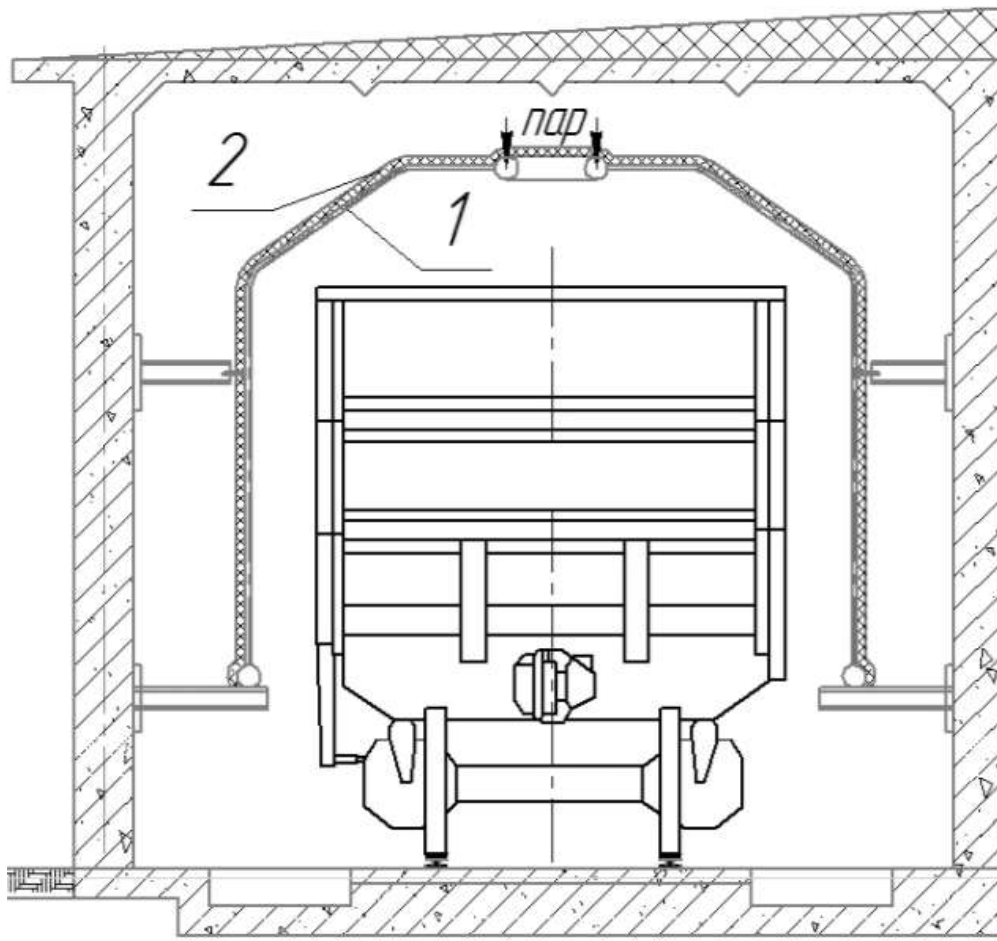
1 - стенки из бетона; 2 - паровые регистры на боковых стенках; 3 - паровой регистр на потолке;  
4 - вентилятор; 5 - сопла; 6 - вагон.

Рис. 2.5. Схема размораживающего устройства, исходный вариант

Для ускорения процесса размораживания угля, размораживающее устройство предполагалось оснастить дутьевыми вентиляторами (поз.4) в количестве 16 шт. Забор горячего воздуха должен был осуществляться расположенным под крышей воздуховодом, из верхней точки помещения размораживающего устройства и направляется в общий раздающий короб, а затем через сопла (поз.5) с шагом 0,5 метра на днище вагонов (поз.6).

Практика эксплуатации на других объектах показала, что включение в работу вентиляторов приводит к интенсивному перемешиванию воздуха внутри размораживающего устройства. В результате горячий воздух с температурой  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше, попадая в нижнюю часть размораживающего устройства, приводит к перегреву подшипников колесных пар и тормозного оборудования. В результате на размораживающих устройствах вентиляторы не устанавливались. Однако при отсутствии вентиляторов, не смотря на высокие параметры насыщенного пара (давление  $0,8-1,0\text{ МПа}$ ), снизилась интенсивность процесса разогрева, что привело к увеличению длительности нахождения вагонов в размораживающих устройствах.

Для интенсификации процесса теплообмена был выполнен проект реконструкции размораживающих устройств №1,2. Нагревательные элементы (рис 2.6, 2.7) были выполнены в виде шатра, с установкой отражающих экранов из листовой стали.



1 - паровые регистры в виде шатра; 2 - отражающие экраны из листовой стали.

Рис. 2.6. Схема размораживающего устройства, модернизированный вариант





Рис. 2.7. Общий вид нагревательных экранов размораживающего устройства после модернизации

Диаметры входных и выходных коллекторов были уменьшены. Уменьшение диаметра коллекторов нагревательных элементов привело к более лёгкому пуску размораживающих устройств из-за улучшения гидравлического режима [30]. Для обеспечения надёжного гидродинамического режима по длине размораживающего устройства, нагревательные элементы были разделены на 4 секции каждый. Конденсат собирается из нижних коллекторов и направляется в конденсатную бойлерную. Для снижения вероятности перегрева деталей вагона были снижены параметры пара на входе в размораживающем устройстве до 0,3-0,5 МПа. Снижение температурного напора компенсировано за счет увеличения теп-

лообменной поверхности, для чего диаметр и шаг труб в нагревательных элементах уменьшен. Характеристики модернизированных нагревательных элементов размораживающих устройств №1,2 представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

№п/п	Наименование	Размораживающее устройство №1,2 (для одного размораживающего устройство)
1	Шаг труб	150 мм
2	Общее кол-во труб	3 160 шт.
3	Общая протяжённость труб	14 490 м
4	Общая масса экранных труб	31,16 т
5	Общая площадь поверхности	1456 м <sup>2</sup>

Суммарная площадь нагревательных элементов размораживающего устройства до модернизации составляла 2108 м<sup>2</sup>. После модернизации суммарная эффективная площадь нагревательных элементов увеличилась на 38 % и составила 2912 м<sup>2</sup>. В качестве дополнительной меры снижения потерь тепла через стены здания предусмотрено нанесение тепловой изоляции на обратную сторону излучающего экрана.

Принципиальная тепловая схема приведена на рис. 2.8. Основным источником тепла на угольном терминале АО "Восточный порт" - это котельная. На котельной установлено четыре угольных паровых котла КЕ-25-14С. Пар от котлов можно разделить на три группы: на размораживающие устройства №№1-4, на бойлерную установку котельной и на собственные нужды котельной.

Основная часть пара подается в размораживающие устройства, где теплом пара обеспечивается разогрев угля перед его разгрузкой в вагоноопрокидывателе. Конденсат, получаемый после размораживающего устройства, направляется в

конденсатную бойлерную, которая обеспечивает теплом часть тепловой нагрузки комплекса ОАО "Восточный порт".

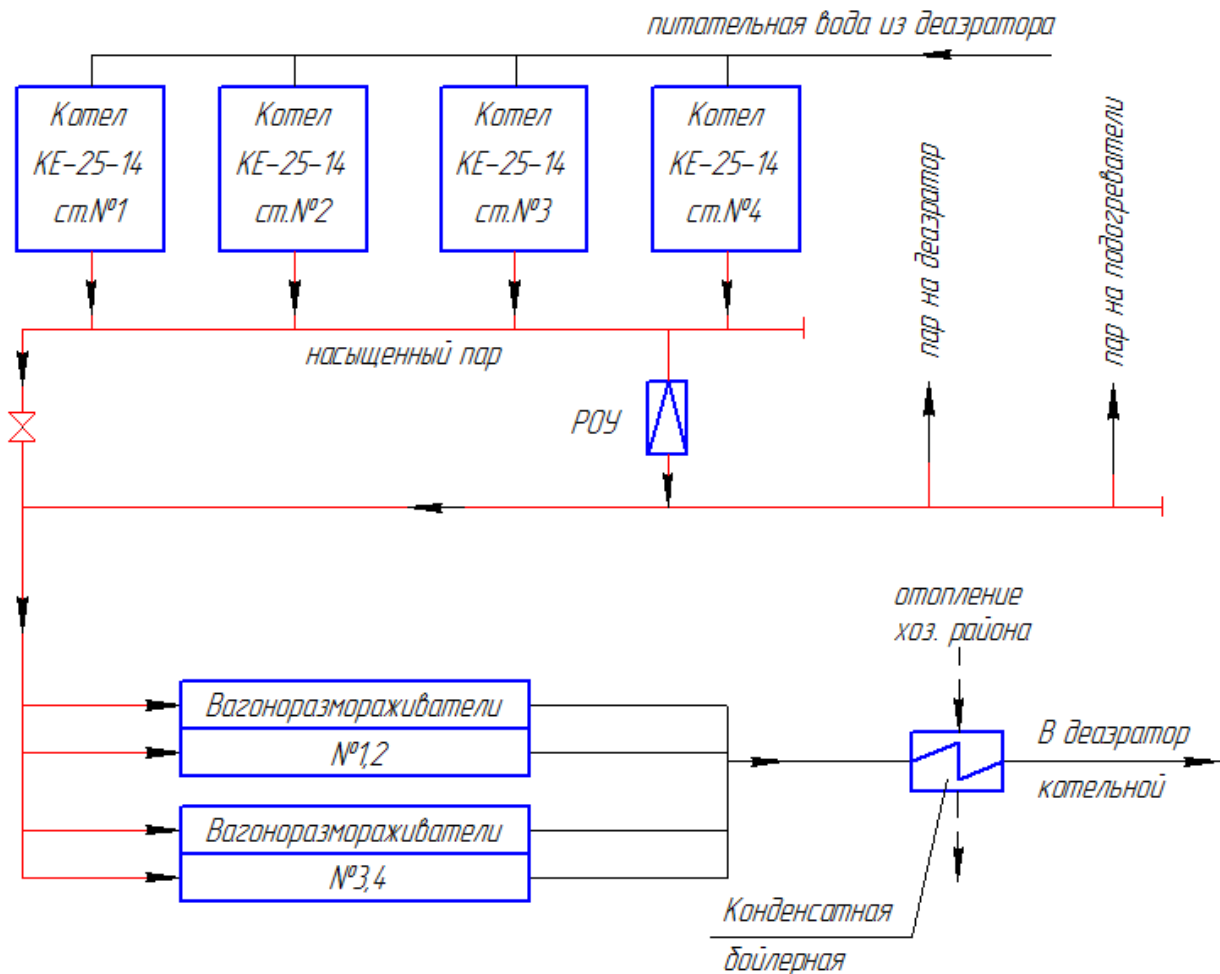


Рис. 2.8. Принципиальная тепловая схема

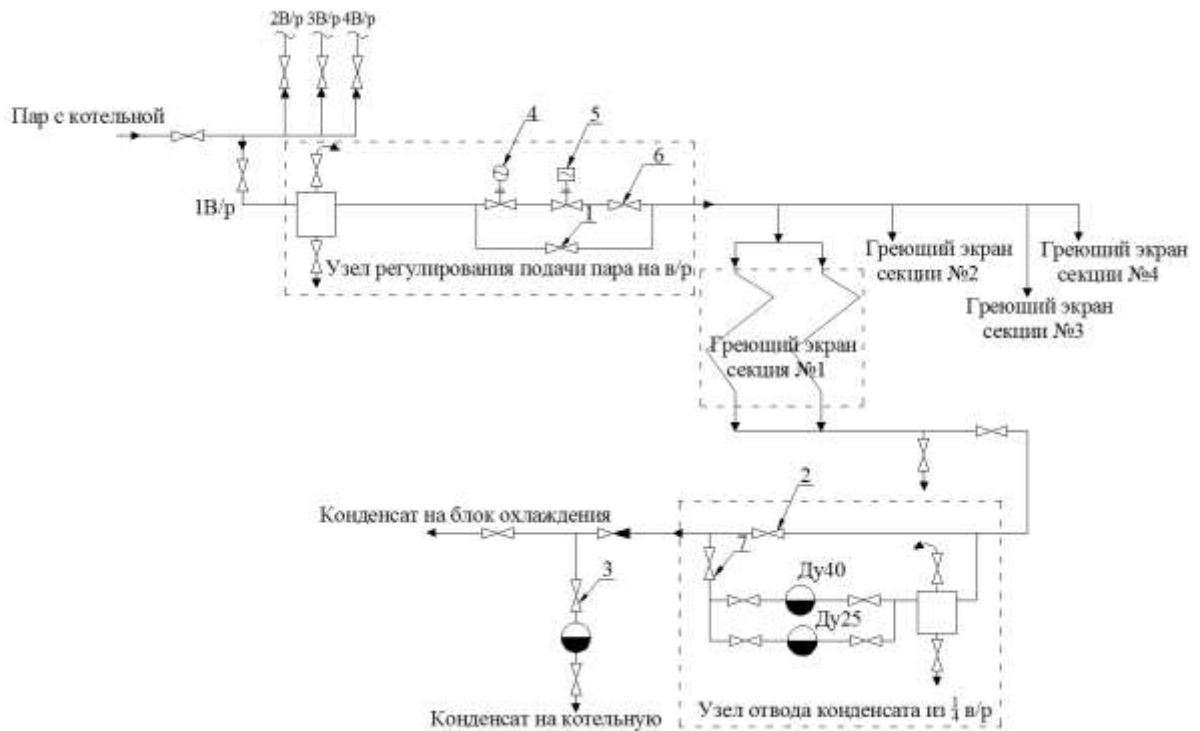
Часть пара подается в атмосферный деаэратор для обеспечения деаэрирования всего возвращаемого в котельную конденсата, а так же подпиточной воды. Бойлерная установка на котельной обеспечивает теплоснабжение угольного терминала и котельной. Конденсат после бойлерной установки котельной возвращается в деаэратор. Для всех потребителей необходим пар с давлением 0,5 - 0,6 МПа. Котлы спроектированы на работу с давлением насыщенного пара 1,4 МПа. Необходимо дросселировать пар на котельной для обеспечения нормальной работы теплопотребляющих установок, в результате чего теряется энергия.

Более 50 % пара потребляют размораживающие установки. При увеличении давления пара подающегося на размораживающие установки до 0,7 МПа, конден-



сат в бойлерную подаётся с очень высокой температурой, и тепловой нагрузки потребителей недостаточно для охлаждения конденсата. В результате на выходе из конденсатной бойлерной конденсат может иметь температуру  $105^{\circ}\text{C}$  и выше, что усложняет его возврат в атмосферный деаэратор котельной [27].

На рисунке 2.9 приведена схема подачи пара и отвода конденсата из размораживающего устройства.



1,2,3,6,7 - задвижки; 4 - электрозадвижка; 5 - регулятор давления пара

Рис.2.9 Схема трубопроводов подачи пара и отвода конденсата с размораживающее устройство

Пар от котельной подается на узел регулирования. С помощью регулятора давления (поз. 5, рис 2.9) в греющих секциях размораживающего устройства (в каждом размораживающем устройстве четыре секции по 54 греющих панелей в каждой) давление пара поддерживается на заданном уровне. Пар проходя через секции, отдает тепло вагонам с углем и конденсируется. На выходе из греющих секций установлены узлы отвода конденсата для предотвращения проскока пара через греющие секции. Изменяя давление пара подаваемого на греющие секции можно регулировать температуру греющей секции, т.к. пар насыщенный. В результате изменяется температура воздуха внутри размораживающего устройства.

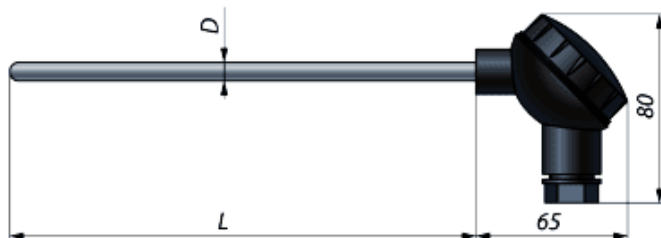
Изменяя давление пара подающегося на греющие секции можно увеличивать или уменьшать время разогрева угля.

## 2.2 Методика проведения эксперимента

Сотрудниками кафедры "Теплоэнергетики и теплотехники" ДВФУ совместно с персоналом АО "Восточный порт" проведены тепловые испытания размораживающих устройств №1÷4 [29], [28], [32]. Одной из основных задач при проведении испытаний было определение такого давления пара подаваемого на размораживающее устройство, при котором не возникала опасность повреждения элементов вагонов от воздействия температуры. Ограничения максимальной температуры различных деталей полувагона при его разогреве в размораживающем устройстве приведены в табл. 1.1.

Измерения величин при испытаниях, характеризующих работу размораживающего устройства (избыточное давление пара на паровые регистры, расход пара и конденсата, температура конденсат и т.д.) производилось по местным приборам. Измерение температуры угля, воздуха и металлических частей вагонов производились термометрами сопротивления 50П, подключенных к измерителю по трехпроводной схеме [60], [65].

Для измерения температуры угля и воздуха использовались датчики ДТС025-50П с измерительным зондом длиной 1600 мм, рис. 2.10а, для измерения температуры металла использовались датчики ДТС224-50П поверхностного типа, рис. 2.10б.



а) ДТС025-50П



б) ДТС224-50П

Рис. 2.10. Датчики термометров сопротивления

При установке датчиков поверхностного типа на измеряемую поверхность наносилась термопаста, а сам датчик покрывался изоляцией для защиты от излучающего воздействия нагревательных экранов, рис. 2.11.

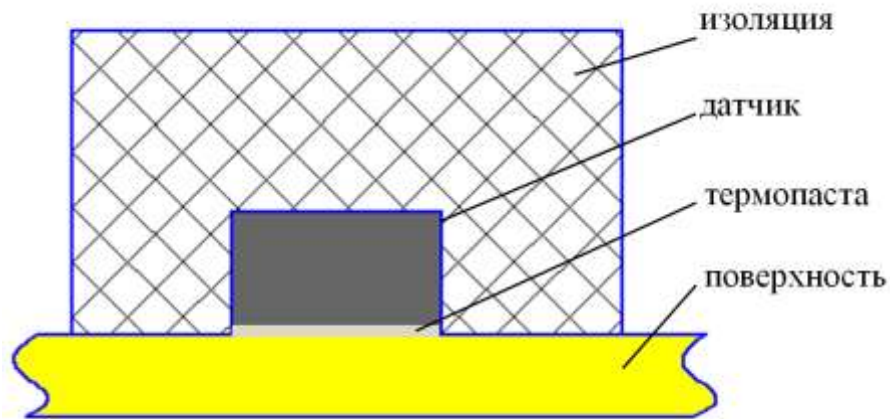
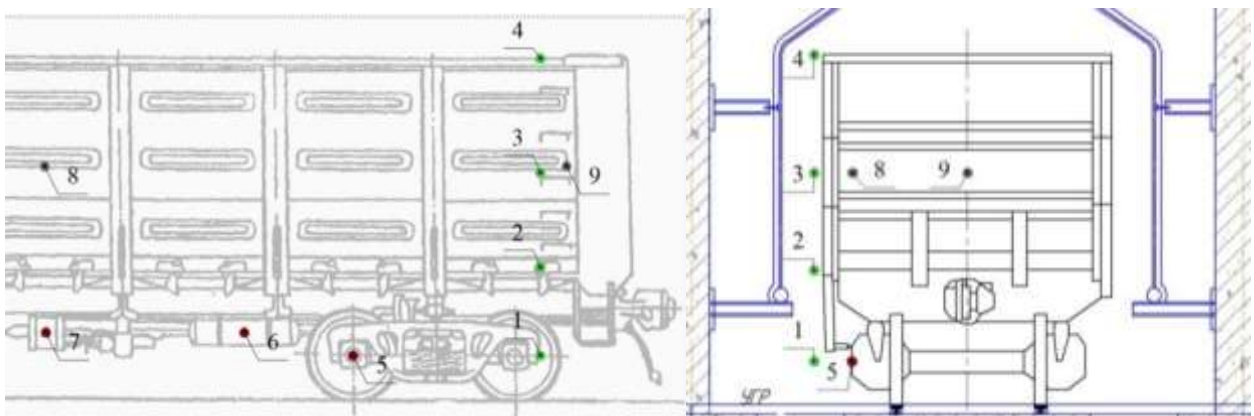


Рис. 2.11. Схема установки поверхностного датчика на исследуемую поверхность

Для измерения температурных полей вагонов после размораживающего устройства использовался тепловизор SAT-G90. На контрольный вагон устанавливались датчики температуры в соответствии со схемой измерения, приведенной на рисунке 2.12.



1÷4 - температура воздуха; 5÷7 - температура металла; 8÷9 - температура угля

Рис. 2.12. Схема измерения температуры при испытании размораживающего устройства

Контролировались следующие температуры: т.1 - температура воздуха на уровне подшипника колесной пары (уровень +0,500 мм); т.2 - температура воздуха на уровне днища вагона (уровень +1,700 мм); т.3 - температура воздуха на

уровне середины вагона (уровень +2,300 мм); т.4 - температура воздуха на уровне верха вагона (уровень +3,700 мм); т.5 - температура металла подшипника колесной пары; т.6 - температура металла воздушного резервуара; т.7 - температура металла тормозного цилиндра; т.8 - температура угля в середине вагона у боковой стенки вагона; т.9 - температура угля в середине вагона у торцевой стенки вагона.

Порядок проведения исследований следующий. Перед постановкой вагонов, размораживающее устройство находилось в горячем резерве. На экспериментальный состав в контрольные точки устанавливались датчики температуры. После этого локомотивно-составительская бригада производила постановку вагонов со смерзшимся топливом в размораживающее устройство. Выполнялся замер температуры с шагом 5 минут в течение всего процесса разогрева. После выхода вагона из размораживающего устройства выполнялось фиксация температурных полей с помощью тепловизионной камеры. Экспериментальные исследования проведены для семи контрольных вагонов, таблице 2.2. Помимо температур, проводились измерения общих параметров работы размораживающего устройства: давление пара подающегося на разогрев; расход, давление и температура конденсата на выходе из размораживающего устройства; температура наружного воздуха.

Таблица 2.2.

Наименование	Давление пара, МПа	Температура окружающего воздуха, °С	Продолжительность нагрева, мин
	$P_{п}$	$t_{нв}$	$\tau$
Опыт 1	0,49	+3,5	85
Опыт 2	0,49	+3,0	60
Опыт 3	0,4	-2,1	95
Опыт 4	0,35	+2,7	110
Опыт 5	0,49	+3,0	165
Опыт 6	0,4	+3,4	140
Опыт 7	0,35	+1,9	150

### 2.3 Оценка погрешности эксперимента

Характеристика приборов используемых при измерении представлена в таблице 2.3. Оценка погрешности измерений рассчитывалась с учетом [91].

Таблица 2.3

Наименование прибора	Параметр замера	Характеристика прибора
1. Барометр-анероид метеорологический БАММ-1	Атмосферное давление	Предел основной допускаемой погрешности измерений, не более $\pm 0,2$ кПа (1,5 мм.вод.ст), Цена деления шкалы, 01 кПа
2. Термометр сопротивления дтс025-50П класс допуска А	Температура воздуха и уг-ля	диапазон измерения $-50...+500$ °С; Предел основной допускаемой абсолютной погрешности измерений, не более $\pm(0,15+0,002 \cdot  t )$ , °С
3. Термометр сопротивления дтс224-50П класс допуска А	Температура поверхности	диапазон измерения $-50...+250$ °С; Предел основной допускаемой абсолютной погрешности измерений, не более $\pm(0,15+0,002 \cdot  t )$ , °С
4. Измеритель двухканальный 2ТРМ0А	Значения температуры на экране	Предел основной допускаемой приведенной погрешности при измерении термопарой 0,5%
5. Секундомер СОСпр-2а-3-000 механический	Время	Допустимая погрешность за 30 минут, $\pm 1,6$ с
6. Манометр показывающий МП-160, класс точности 1,0	Давление пара	Рабочее давление 0-1,0 МПа, Предел абсолютной погрешности измерений, не более 0,01 МПа

После проведения эксперимента была проведена оценка величины неисключенной систематической погрешности измерения температуры, давления и временных интервалов, результаты которой представлены в таблице 2.4.

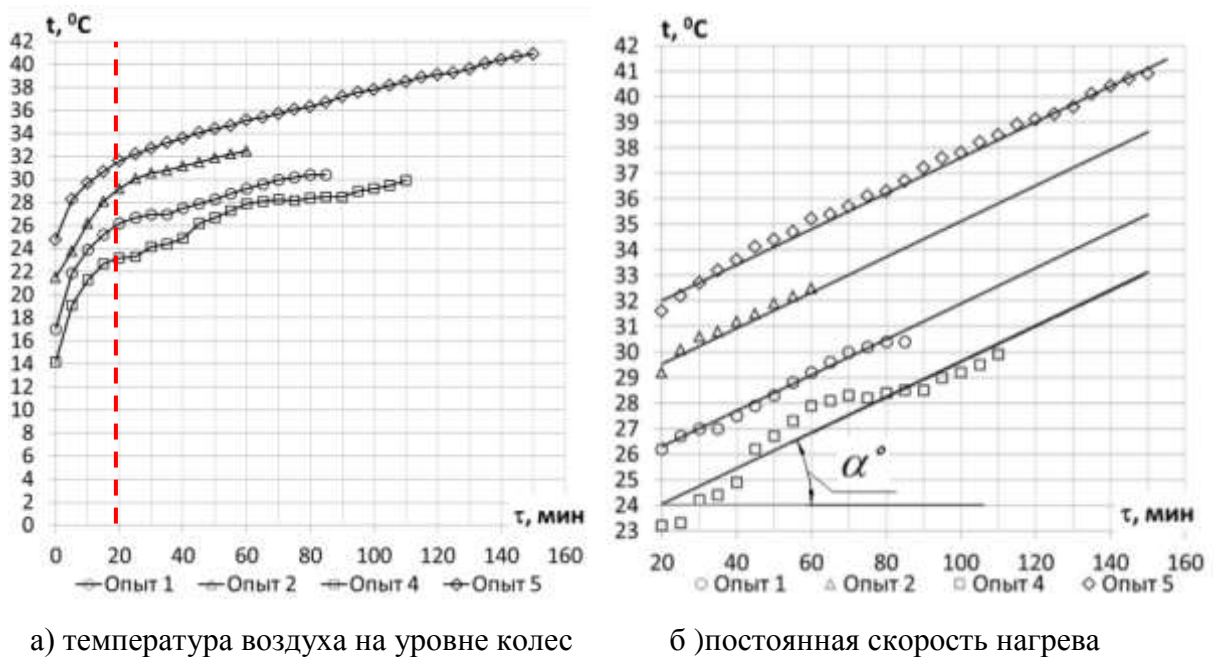
Таблица 2.4

Параметр	Базовое значение	Характеристики измерительного прибора	Максимальная погрешность измерения	
		Предел измерения	Абсолютная, $\Delta$	Относительная, $\delta$
Изменение температуры воздуха $t_{\text{возд.}}$ , °C	11.....53	-50...+500 °C	$\pm(0,15+0,002 \cdot  t )$ °C	0,98..2,06%
Изменение температуры угля $t_{\text{возд.}}$ , °C	4.....30	-50...+500 °C	$\pm(0,15+0,002 \cdot  t )$ °C	1,2..4,45%
Изменение температуры подшипника $t_{\text{возд.}}$ , °C	4.....12	-50...+250 °C	$\pm(0,15+0,002 \cdot  t )$ °C	1,95..4,45%
Изменение температуры тормозного цилиндра $t_{\text{возд.}}$ , °C	10.....11	-50...+250 °C	$\pm(0,15+0,002 \cdot  t )$ °C	2,06..2,3%
Изменение температуры воздушного резервуара $t_{\text{возд.}}$ , °C	8.....22	-50...+250 °C	$\pm(0,15+0,002 \cdot  t )$ °C	0,88..2,08%
Время, с	300		$\pm 0,27$	0,09%
Давление пара, МПа	0,25...0,39	0...1,0	$\pm 0,01$	2,56...4%
Давление атмосферное	98,39кПа... 99,323кПа	80000- 106000 Па	$\pm 200$ Па	0,2%

Базовые значения таблицы 2.3 выбраны, исходя из условий эксперимента. Таким образом, рассчитанная величина неисключенной систематической погрешности свидетельствует о достаточной точности экспериментальных данных.

## 2.4 Результаты экспериментальных исследований

Температура воздуха на уровне колесной пары (рис. 2.12, т.1) представлена на рисунке 2.13.



а) температура воздуха на уровне колес

б) постоянная скорость нагрева

Рис. 2.13. Температура воздуха на уровне колесных пар

На рисунке хорошо видно, что в начальный период времени, составляющий около 20 минут (рис.2.13а), температура возрастает, в среднем на 6-9  $^{\circ}\text{C}$ . Дальнейший рост температуры идет с постоянной скоростью (рис. 2.13б), что характеризуется одинаковым углом наклона  $\alpha$  во всех опытах. Во всех четырех опытах зафиксирована разная начальная температура, при этом температура наружного воздуха во всех опытах оставалась практически постоянной (от +2,7 до +3,5). Разная начальная температура объясняется разным временем, требуемым на постановку вагонов в размораживающее устройство.

Чем продолжительнее время маневровых работ - тем ниже начальная температура, поскольку при постановке вагона в размораживающее устройство воро-

та находятся в открытом положении, и размораживающее устройство успевает выхолаживаться за счет охлаждения наружным воздухом. В результате температура воздуха в размораживающее устройство на уровне колёсных пар определяется не только временем нахождения вагона в размораживающем устройстве, но и временем маневровых работ при постановке вагона. Этот период времени плохо поддается систематизации, поскольку зависит от большого числа субъективных факторов (слаженность работы маневровой бригады, взаимодействие с РЖД, наличие свободных ж/д линий, команд стивидора и т.д.). При этом параметры пара, подающегося в паровые регистры, не влияет на угол наклона  $\alpha$  и, соответственно, на скорость прогрева воздуха в районе колесных пар. Это наглядно видно из рис. 2.13б. При трех опытах давление пара в регистрах (и соответственно температура нагревательных экранов) была одинакова и соответствовала 0,49 МПа (температура насыщения  $t_s=151,1$  °С). На рис. 2.13б эти опыты соответствуют трем верхним линиям. Нижняя линия соответствует давлению 0,35 МПа (температура насыщения  $t_s=138,9$  °С). Разница в 12 °С не оказывает никакого влияния на скорость изменения температуры воздуха в нижней части вагона.

На рисунке 2.14а показаны результаты всех измерений после 20 минут, приведенные к одной начальной температуре. Результаты четырех опытов образуют одну общую зависимость, характеризующую скорость нагрева воздуха в нижней части вагона. По результатам обобщения четырех опытов была получена аналитическая зависимость температуры в области колесных пар в зависимости от начальной температуры воздуха и времени пребывания вагона в размораживающем устройстве. Аналитическая зависимость выражена следующим уравнением:

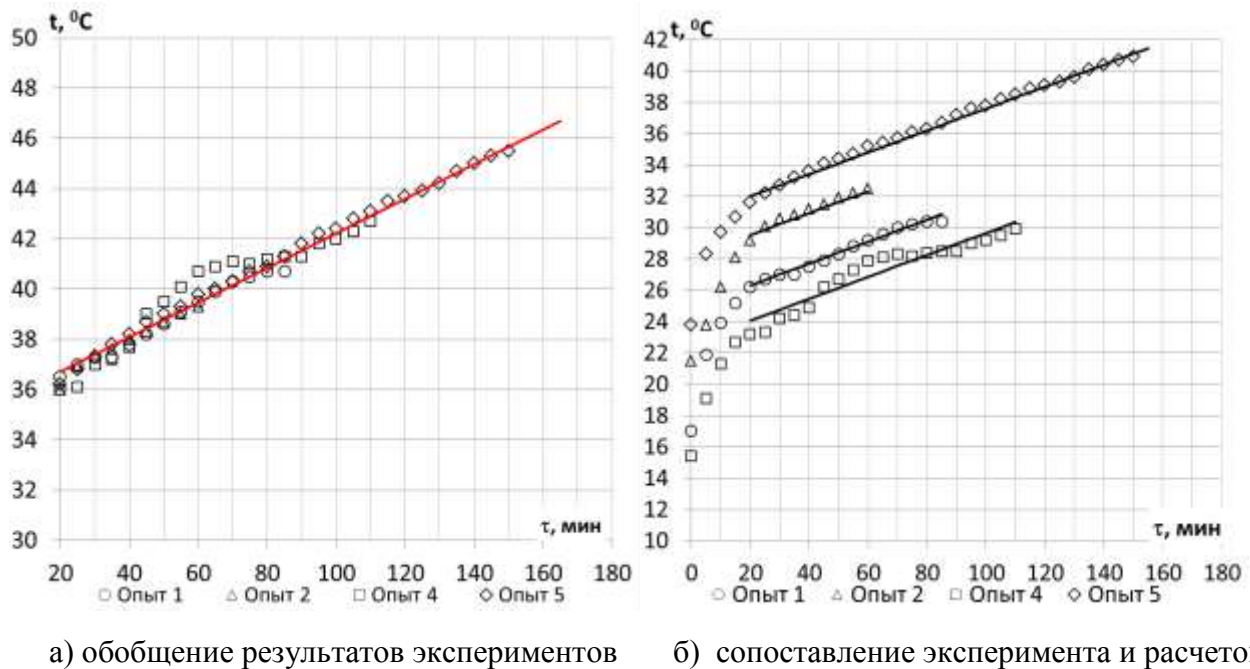
$$t = 0,07 \cdot \tau + 0,75 \cdot t_0 + 12 \quad (2.1)$$

где  $\tau$  - продолжительность пребывания вагона в размораживающее устройство, мин;

$t_0$  - начальная температура воздуха в размораживающем устройстве, °С.



Полученные результаты расчета по приведенной аналитической зависимости были сопоставлены с данными экспериментальных исследований. Результаты сопоставления представлены на рисунке 2.14б.



а) обобщение результатов экспериментов      б) сопоставление эксперимента и расчетов

Рис. 2.14 Зависимость температуры воздуха в нижней части вагона

Расчетные зависимости на рисунке отображены линиями. Как видно, наблюдается хорошая сходимость между данными полученными экспериментальным путем (точки на рисунке, соответствующие разной начальной температуре) и расчетными данными в промежутке времени от 20 до 160 минут.

Температура воздуха в верхней части вагона (рис. 2.15) в начальный период времени, составляющий около 20 - 25 минут, температура возрастает, в среднем на 20-25 °С. Дальнейший рост температуры идет с постоянной скоростью. Для опыта 5 имеется область с неизменной температурой воздуха. В данном опыте (опыт 5) максимальная температура составила 114 °С, при этом температура пара в нагревательных элементах для данного режима составила  $t_s=151,1$  °С (при давлении пара 0,49 МПа). Недогрев воздуха в верхней части вагона до температуры теплоносителя в регистрах составил 39 °С. В процессе нагрева воздуха в верхней части вагона можно выделить три периода: первый период - быстрый нагрев в течение 20-25 минут с подъемом температуры воздуха на 20-25 °С; второй период -

нагрев с постоянной скоростью до предельной температуры; третий период - с постоянной температурой воздуха.

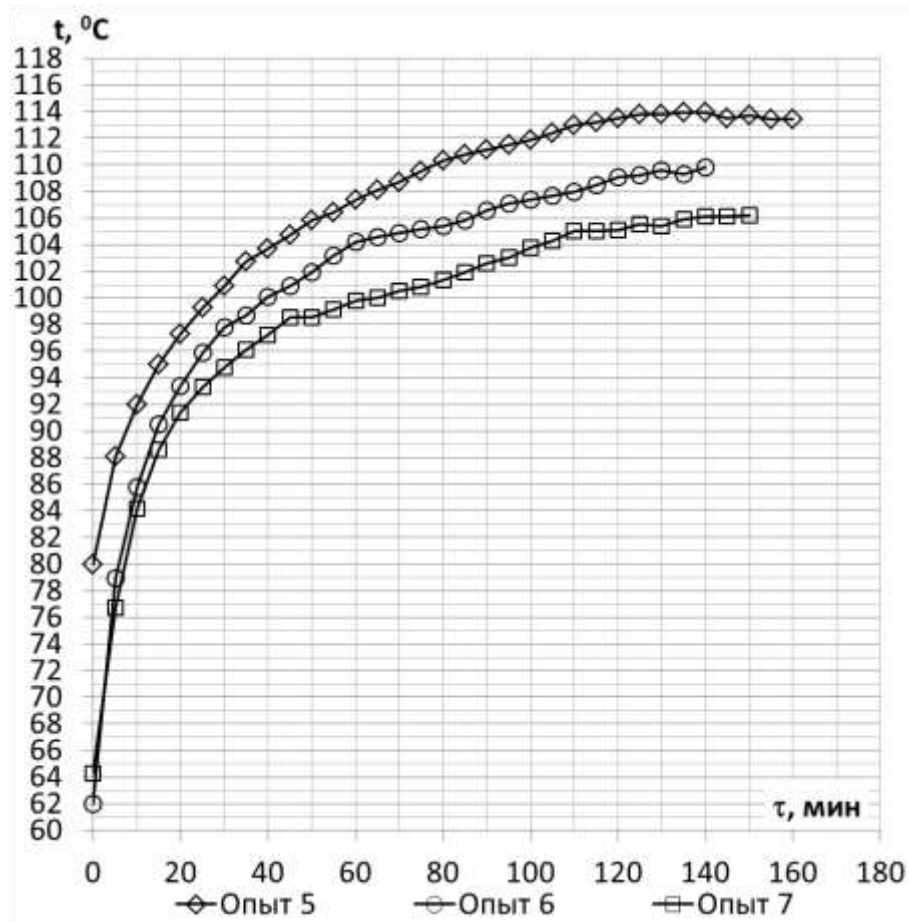


Рис. 2.15. Температура воздуха в верхней части вагона

Температура воздуха в верхней части размораживающего устройства равная  $114^{\circ}\text{C}$  превышает допустимую температуру для металлических обшив вагона, составляющую  $90^{\circ}\text{C}$ . При такой температуре металлические части вагона могут нагреться до температур выше  $90^{\circ}\text{C}$  при определенной продолжительности нахождения в размораживающем устройстве, такую продолжительность можно назвать предельной. Предельная продолжительность нахождения вагона в размораживающем устройстве (по параметру воздуха в верхней части) будет зависеть не только от скорости прогрева воздуха, но и от начальной температуры, т.е. от условий постановки вагона в размораживающее устройство.

На рисунке 2.16 приведены значения температур воздуха по высоте размораживающего устройства.

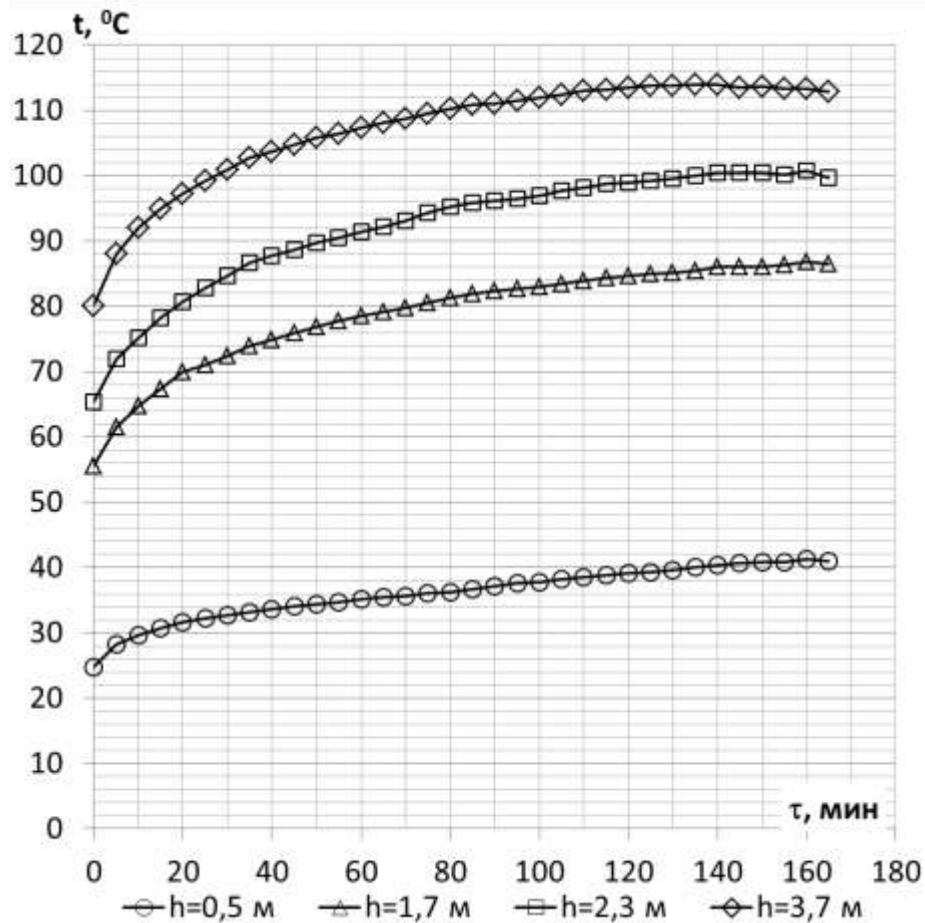


Рис.2.16. Температуры воздуха по высоте размораживающее устройство

Из рисунка 2.16 видно, что температура воздуха по высоте вагона имеет большую неравномерность. Область вагона, которая нуждается в обогреве (стенка вагона по высоте) имеет температурный градиент между верхом вагона ( $h=3,7$  м) и низом вагона ( $h=1,7$  м) около  $30$  °С. В нижней части размораживающего устройства, на высоте  $h=0,5$  м, там, где находятся наиболее подверженные перегреву детали вагона (подшипники, тормозная система), температура воздуха не превышает  $45$  °С.

Температура подшипников колесных пар измерялась в опытах 1 и 3. На рис. 2.17 изображены значения температур поверхности корпуса подшипников колесных пар в процессе разогрева. В опыте 1 одновременно измерялась температура двух подшипников. Скорость изменения температуры в опыте 1, верхние линии на рисунке, составила  $8,28$  и  $8,58$  °С/час. Скорость изменения температуры в опыте 3, нижняя линия на рисунке, составила  $6,06$  °С/час.

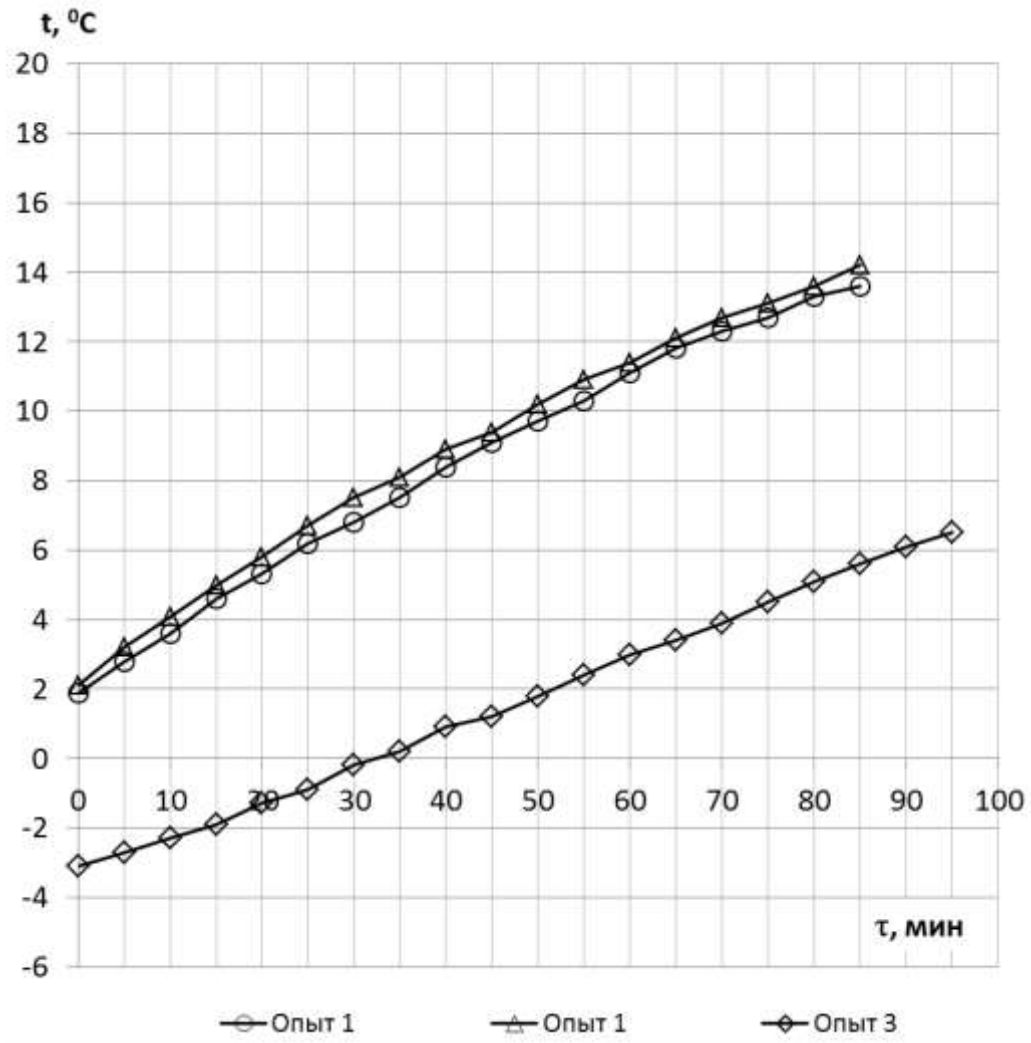


Рис.2.17. Температура корпуса подшипников

Для нагрева до опасных температур ( $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) потребуется не менее 11 часов (при скорости прогрева  $8,58\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{час}$  и начальной температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Такой продолжительный разогрев в размораживающем устройстве отсутствует, следовательно, тепловое состояние буксового узла не будет являться ограничивающим фактором при разогреве вагонов с углем.

Температура металла воздушного резервуара представлена на рисунке 2.18. Изменение температуры носит нелинейный характер, это связано с конструктивной неоднородностью данного элемента. Тонкая стенка резервуара нагревается быстро, за счет этого на начальном этапе имеется область ускоренного изменения температуры. После прогрева стенки начинает прогреваться воздух находящийся внутри сосуда и скорость прогрева уменьшается.

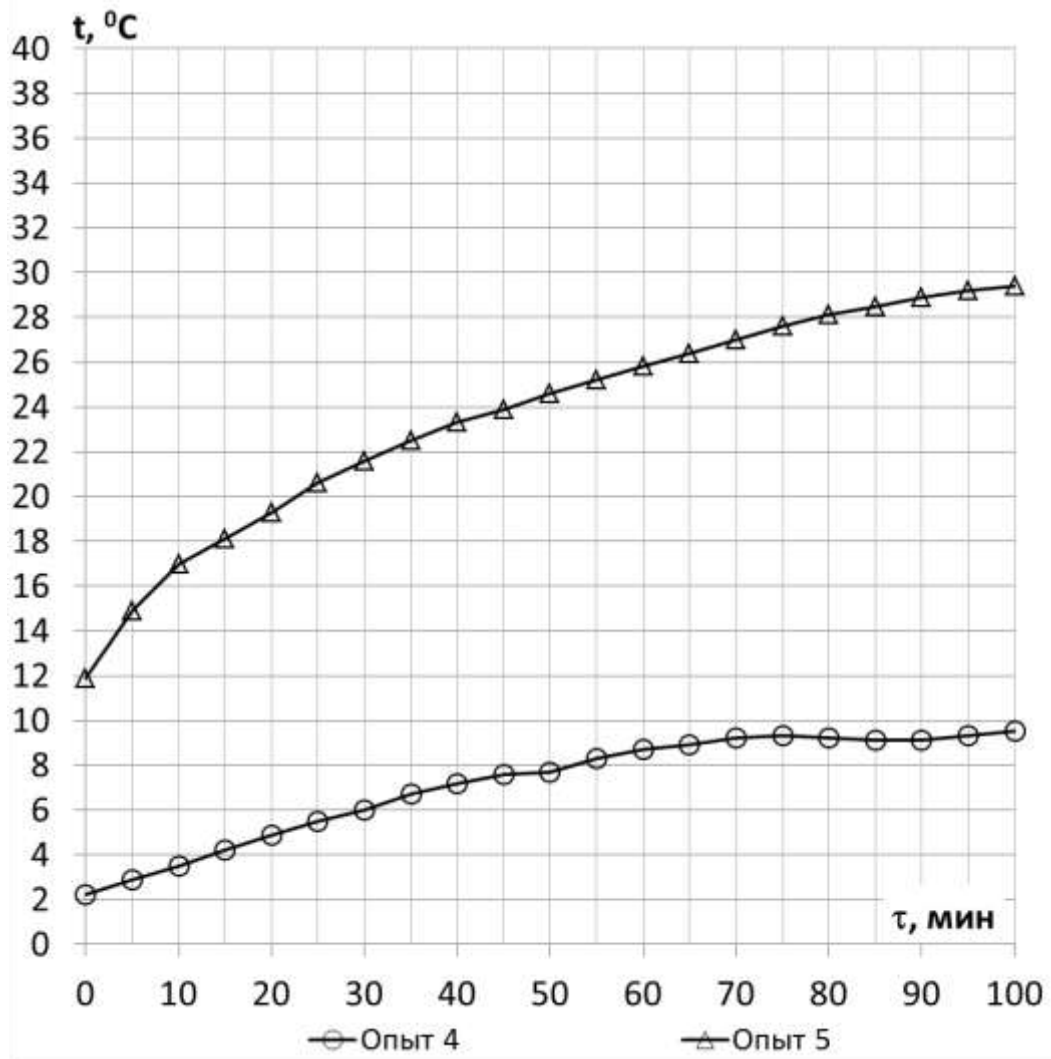


Рис.2.18. Температура воздушного резервуара

Средняя скорость прогрева воздушного резервуара составила:  $4,2$  °C/час для опыта №4 и  $8,16$  °C/час для опыта №5. Нагрев до максимальной температуры составляющей  $70$  °C составит не менее 11 часов (при скорости прогрева  $8,16$  °C/час и начальной температуре  $-20$  °C). Температура металла тормозного цилиндра представлена на рисунке 2.19. Тормозной цилиндр имеет более однородную структуру. Разница в скорости нагрева (рис.2.19) обуславливается разной температурой воздуха в опытах. Средняя скорость прогрева тормозного цилиндра составила:  $10,08$  °C/час для опыта №2 и  $7,08$  °C/час для опыта №3. Нагрев до максимальной температуры составляющей  $55$  °C составит не менее 7 часов (при скорости прогрева  $10,08$  °C/час и начальной температуре  $-20$  °C).

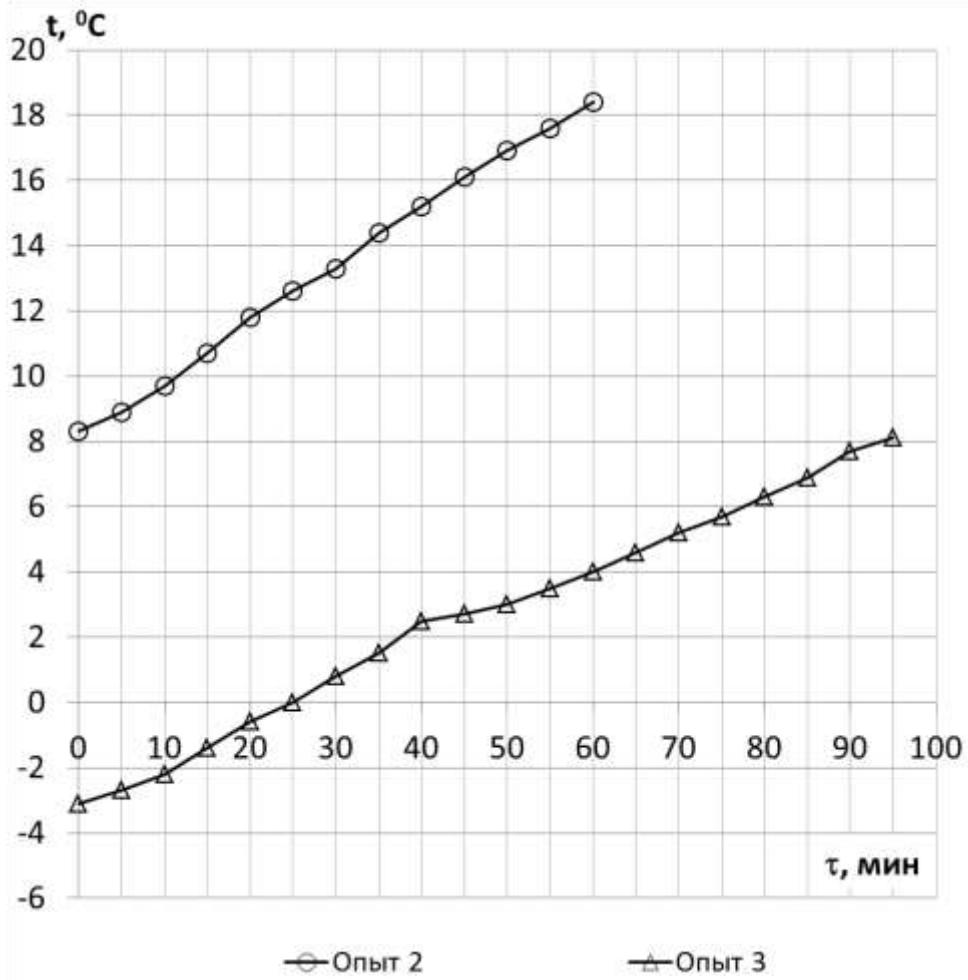


Рис.2.19. Температура тормозного цилиндра

При разогреве угля в размораживающем устройстве в наиболее тяжелых условиях находится верхняя часть вагона, поскольку она расположена в зоне максимальных температур воздуха.

Максимальная температура металлических обшив и остальных узлов вагона не должна превышать  $90^{\circ}\text{C}$ . На рис 2.20-2.24 показаны термограммы, выполненные сразу после выхода из размораживающего устройства. На рис. 2.20 хорошо видна разогретая область металла в верхней части, где отсутствует контакт металла с углем. Эта область и будет являться наиболее подверженной перегреву. На рис 2.20-2.22 температура верха вагона находится в допустимых пределах (около  $85^{\circ}\text{C}$ ). На рис. 2.24 температура металла в верхней части вагона  $t_1 = 70^{\circ}\text{C}$ , несмотря на продолжительное нахождение вагона в размораживающее устройство (110 минут).

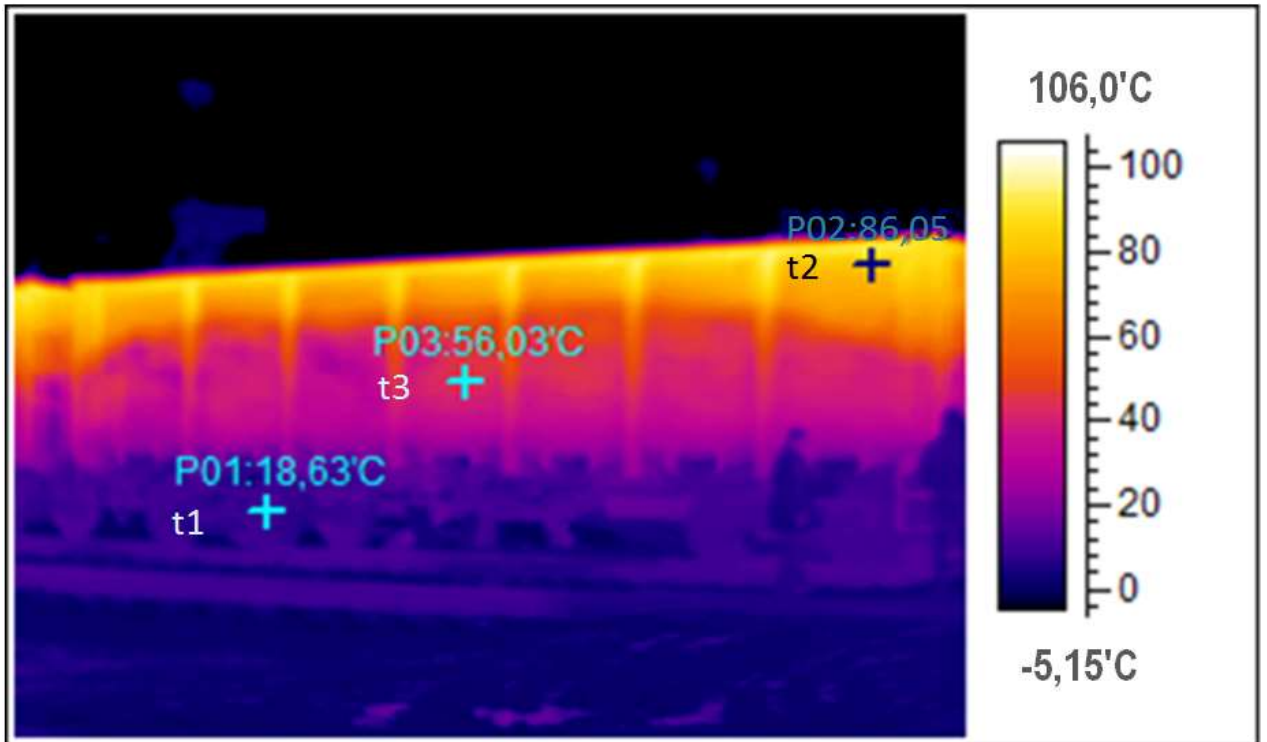


Рис. 2.20 Состав №1. Время нахождения в размораживающем устройстве №3 - 85 минут.

Давление пара в нагревательных экранах  $P_n=0,49$  МПа

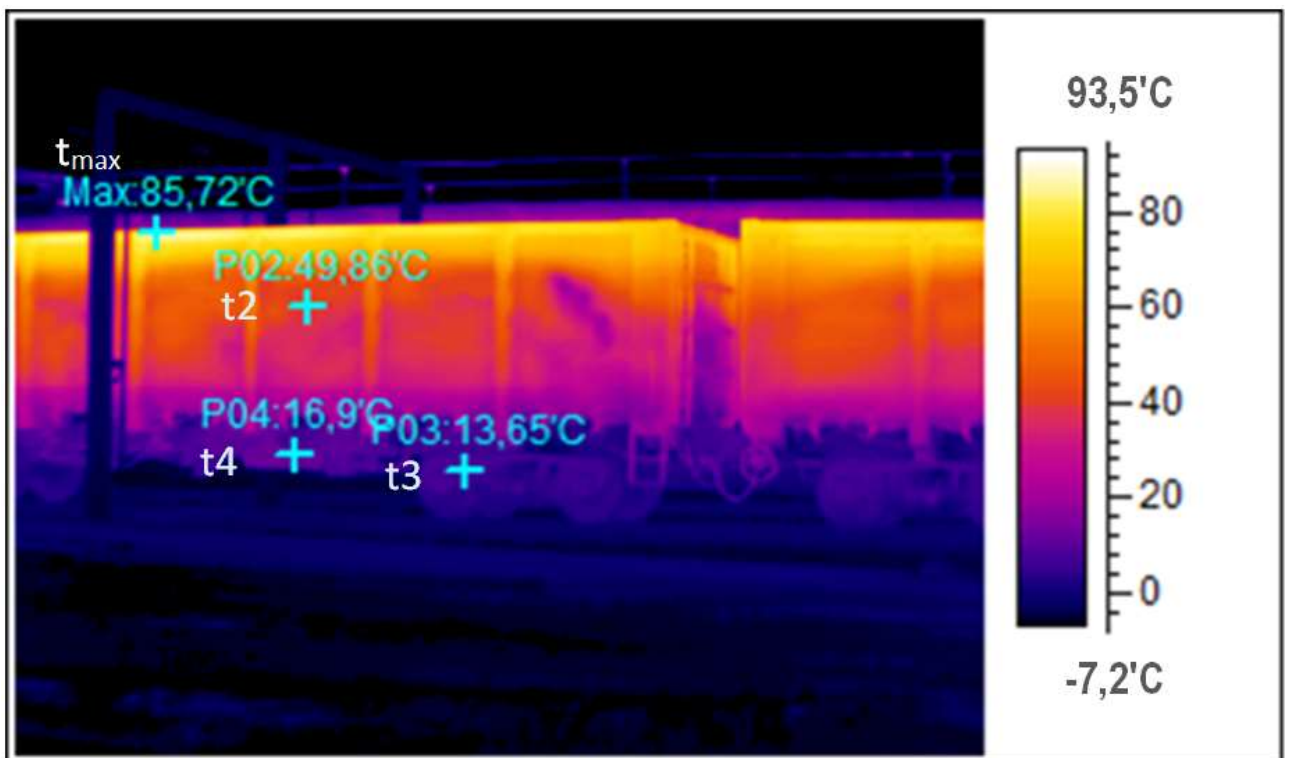


Рис. 2.21 Состав №2. Время нахождения в размораживающем устройстве №1 - 60 минут.

Давление пара в нагревательных экранах  $P_n=0,49$  МПа



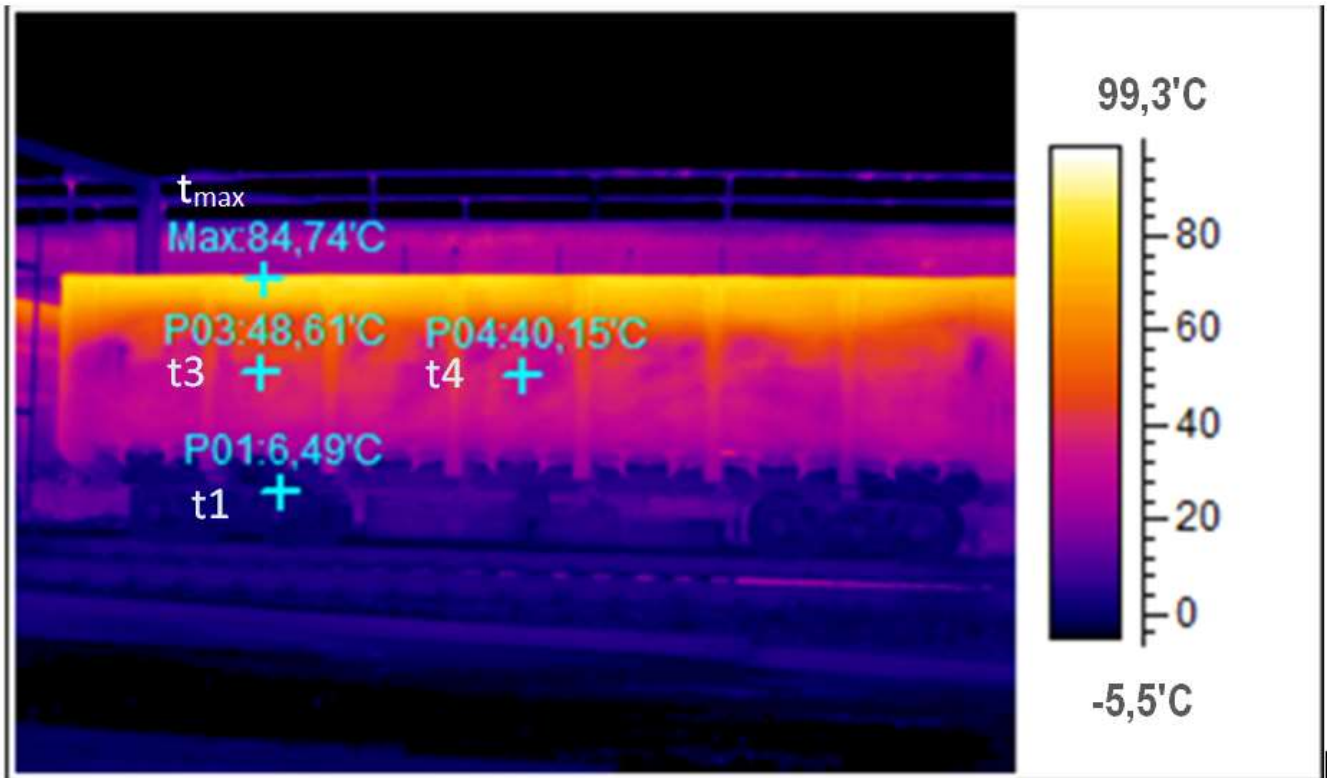


Рис. 2.22 Состав №3. Время нахождения в размораживающем устройстве №2 - 95 минут.

Давление пара в нагревательных экранах  $P_n=0,4$  МПа

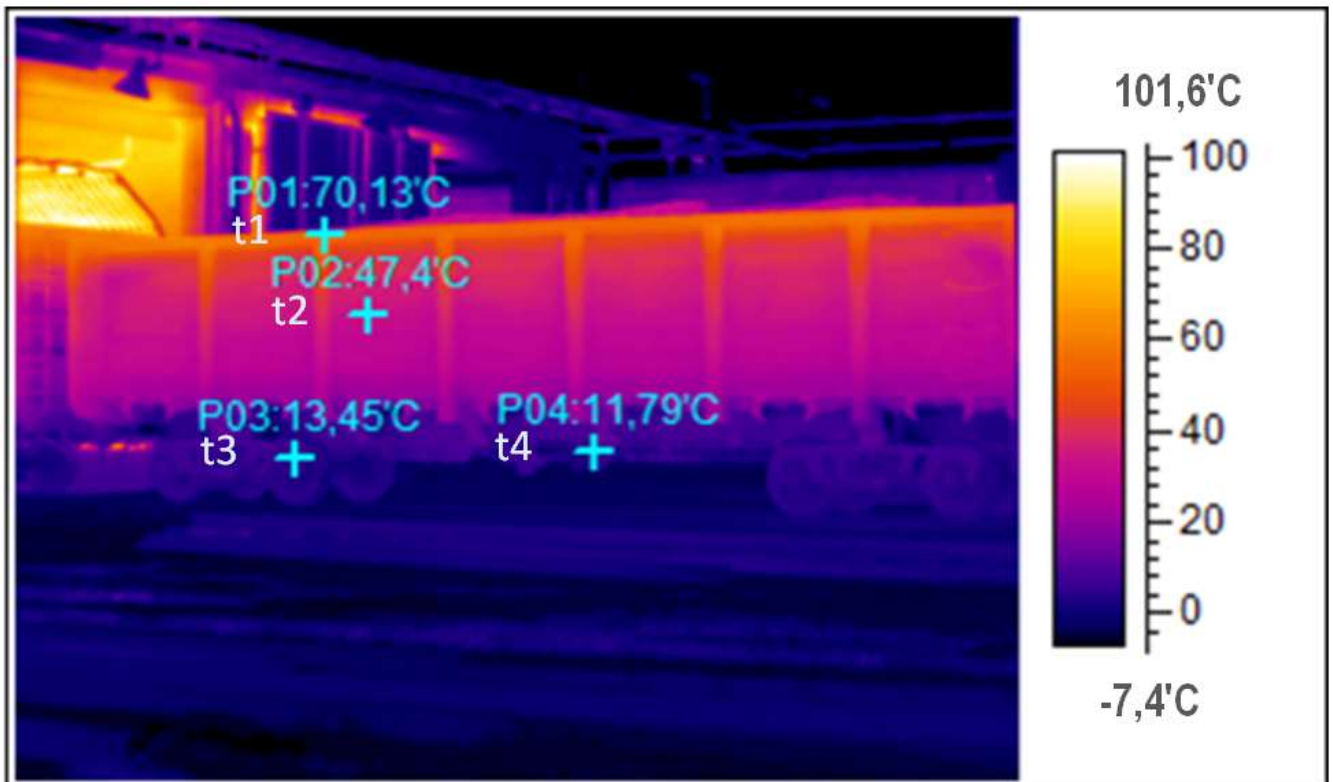


Рис. 2.23 Состав №4. Время нахождения в размораживающем устройстве №1 - 110 минут.

Давление пара в нагревательных экранах  $P_n=0,35$  МПа



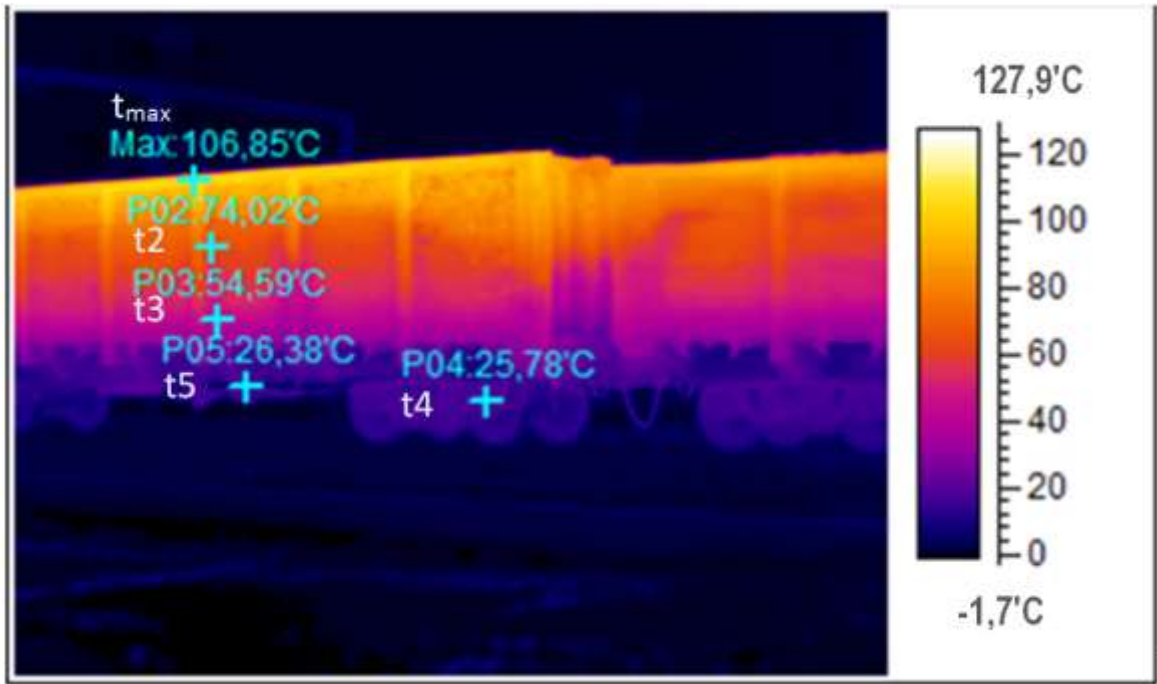


Рис. 2.24 Состав №5. Время нахождения в размораживающем устройстве №4 - 165 минут.

Давление пара в нагревательных экранах  $P_n=0,49$  МПа

Это объясняется низким давлением пара в нагревательных регистрах размораживающего устройства, давление пара в опыте №4 составляло  $P_n=0,35$  МПа. На рис 2.24 видно, что температура металла  $t_{max}$  в верхней части вагона составила  $106$  °С, что является недопустимым с точки зрения эксплуатации вагонов. Такой перегрев обусловлен продолжительным нахождением вагона в опыте №5 и высоким давлением пара в нагревательных регистрах. Температура воздуха в верхней части вагона в опыте №5 составляла  $115$  °С (рис.2.16). Градиент температур между воздухом и металлом в верхней части вагона не превышает  $10$  °С. Для предотвращения перегрева металла в верхней части вагона необходимо, чтобы температура воздуха в верхней части не превышала  $100$  °С. Поскольку, при давлении пара в паровых регистрах  $P_n=0,49$  МПа температура в верхней части вагона составила  $115$  °С, необходимо уменьшить температуру пара подаваемого в регистры на  $15$  °С. Пар на регистры подается насыщенный и снижение температуры на  $15$  °С может быть достигнуто за счет снижения абсолютного давления греющего пара до  $0,33$  МПа. Тогда температура насыщения греющего пара снизится со  $151$  °С, при давлении  $0,49$  МПа, до  $137$  °С.

Температура угля измерялась в двух точках: у боковой стенки, имеющей максимальный прогрев и у торцевой стенки вагона, где интенсивность обогрева меньше. Температуры угля в процессе разогрева приведены на рисунке 2.25, 2.26.

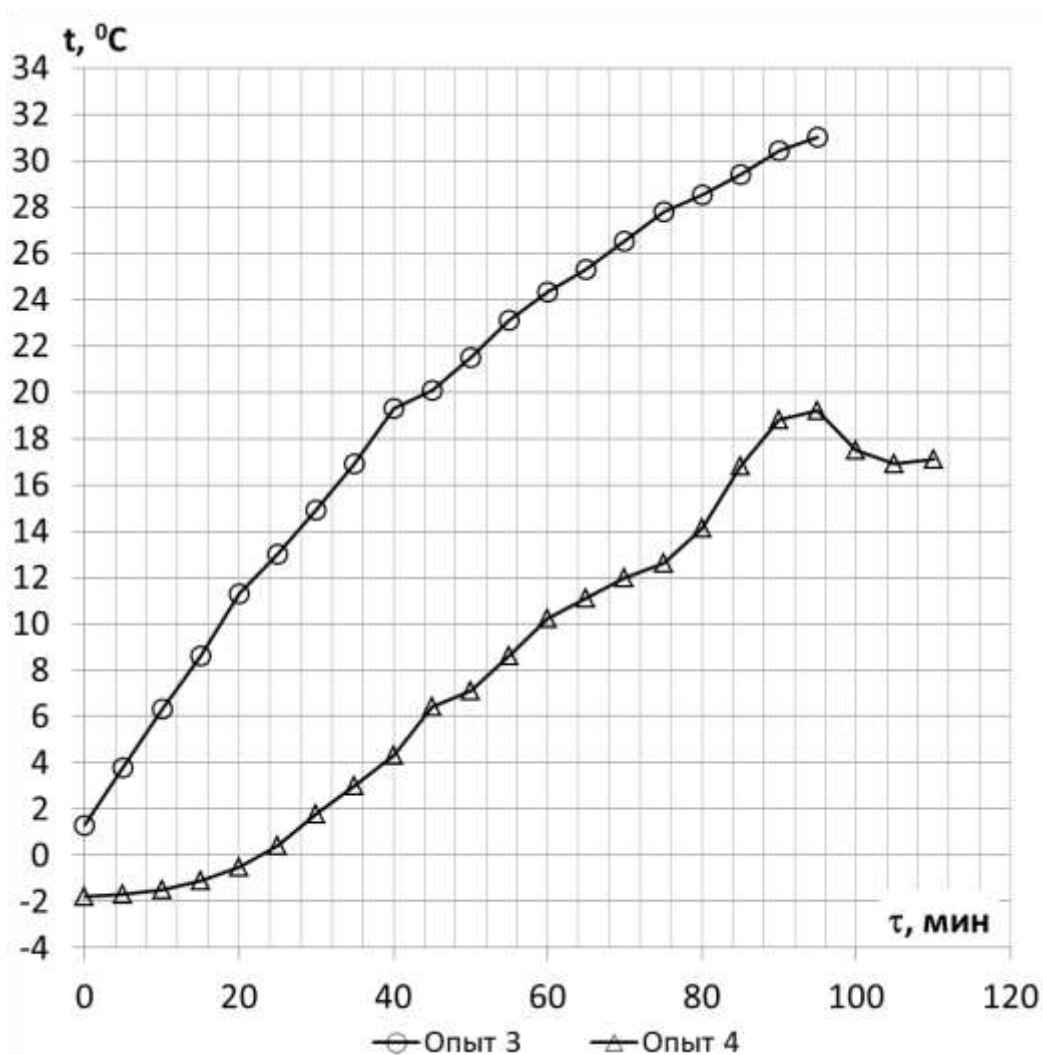


Рис.2.25. Температуры угля у боковой стенки (т.8) при разогреве

Средняя скорость прогрева угля у боковой стенки составила: при давлении пара 0,49 МПа - 18,78 °C/час; при давлении пара 0,35 МПа - 10,32 °C/час. Средняя скорость прогрева угля у торцевой стенки составила: при давлении пара 0,49 МПа - 3,42 °C/час; при давлении пара 0,35 МПа - 2,22 °C/час. В опыте №3 при разогреве угля у торцевой стенки (рис.2.26) виден участок, характеризующий процесс таяния льда в угле, при котором температура практически не изменяется на продолжительном промежутке времени. Для угля у боковой стенки такие участки отсутствуют.

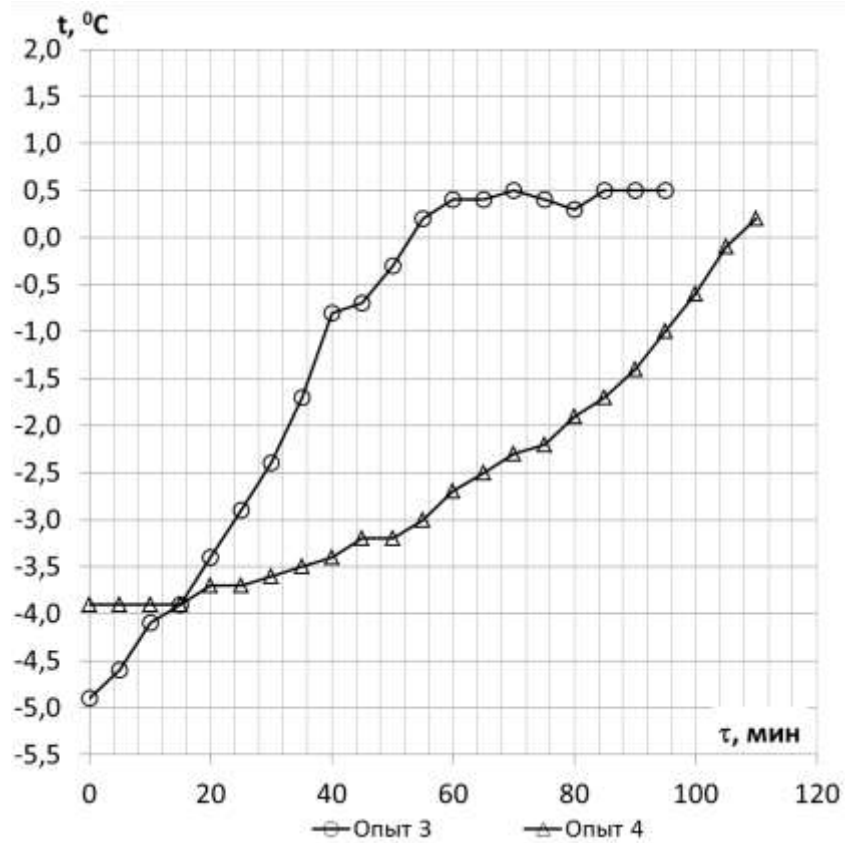


Рис.2.26. Температуры угля у торцевой стенки (т.9) при разогреве

В результате проведенных исследований на полномасштабной установке вагоноразмораживателя были получены скорости нагрева отдельных элементов вагона (таблица 2.5).

Таблица 2.5.

Наименование	Средняя скорость нагрева, °C/ч	Максимальная температура в конце процесса разогрева, °C	Допустимая температура элемента, °C
Уголь у боковой стенки	14,55	30,8	-
Уголь у торцевой стенки	2,82	0,5	-
Корпус подшипника	7,64	14,1	80
Тормозной цилиндр	8,58	18,4	55
Воздушный резервуар	6,18	29,5	70
Стенка вагона в верхней части	48,83	106,9	90

При сопоставлении полученных скоростей нагрева с предельной температурой, при которой допускается нормальная эксплуатация этих элементов (табл. 1.1), получено «безопасное» время разогрева вагона, при котором не происходит перегрева отдельных элементов (рис. 2.27). При расчете выбиралась максимальная скорость нагрева и начальная температура вагона  $-20^{\circ}\text{C}$ . Полученное наименьшее «безопасное» время разогрева для металлической стенки вагона в несколько раз меньше, чем для остальных элементов вагона (тормозное оборудование, подшипники и т.д.). Можно сделать вывод, что ограничивающим фактором при разогреве вагонов с углем будет являться температурное состояние стенки вагона в верхней части.

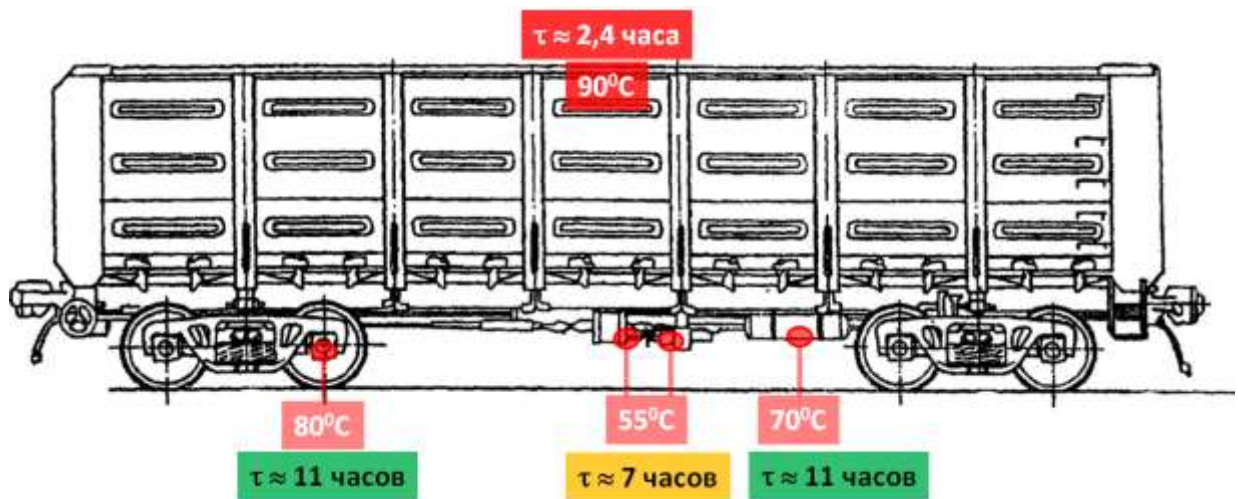


Рис. 2.27 Безопасное время нахождения отдельных частей вагона при разогреве в размораживающем устройстве

На интенсивность процесса разогрева угля влияет множество факторов, которые можно разделить на три группы:

- физико-механические и теплофизические характеристики угля;
- режим работы размораживающего устройства, температура нагревательных элементов;
- условия перевозки угля до места разогрева, его начальная температура и прочность смерзания.

К первой группе факторов относятся: объемная насыпная масса угля, влажность, содержание незамерзающей воды, размер частиц, удельная поверхность,

теплопроводность, теплоемкость и др. Ко второй группе факторов следует отнести: температуру воздуха внутри размораживающего устройства, влажность воздуха, количество подводимого тепла, тепловые потери с поверхности размораживающего устройства, скорость ветра, наличие осадков и др. К третьей группе факторов относятся: время транспортировки, температура по пути следования состава с углем, скорость движения состава, наличие осадков и др. Изучение влияния указанных факторов на протекание процесса разогрева угля в натуральных условиях потребовало бы проведения множества экспериментов. Необходимо отметить, что ряд факторов, таких как температура воздуха, скорость ветра и наличие осадков носят случайный характер. Поэтому наиболее целесообразным способом изучения процесса разогрева угля в размораживающем устройстве является метод численного моделирования. В этом случае экспериментальные исследования в натуральных условиях необходимы для выявления общих закономерностей и обоснования ограничения модели.

### **Глава 3. Численное моделирование процесса теплообмена в размораживающем устройстве.**

#### **3.1. Исследование процесса переноса тепла при разогреве угля.**

Задачей расчёта теплообмена при разогреве угля в размораживающем устройстве является выбор оптимального режима разогрева. Необходимо подобрать такой режим разогрева, тепловой поток и скорость движения воздуха внутри размораживающего устройства, чтобы уголь определённой марки успел прогреться на заданную толщину и температуру за минимально возможное время. Важным фактором является то, чтобы за время пребывания вагона внутри размораживающего устройства, температура его подшипников не превысила значение в  $80^{\circ}\text{C}$ , а металлические борты не перегревались относительно температуры  $90^{\circ}\text{C}$ .

Распространение тепла в слое угля описывается уравнениями нестационарной теплопроводности, на основании решения которых можно правильно задать допустимый тепловой поток, определить время размораживания слоя угля задан-

ной толщины. Аналитическое решение этой задачи, связанной с тепловыми и диффузионными процессами, приводит к сложной системе нелинейных и дифференциальных уравнений, решение которой представляет большие трудности. В связи с осложнениями в решении этой задачи, разными организациями были предложены свои методики расчета теплообмена при разогреве углей в размораживающем устройстве.

Ленинградским отделением института Теплоэлектропроект были проведены эксперименты по размораживанию углей на специальных стендах. В строительной лаборатории сооружен стенд для экспериментального изучения разогрева смерзшегося топлива электрическими инфракрасными излучателями. Всего было проведено 68 опытов. В результате была установлена длительность размораживания типичных сортов при переменной величине теплового потока (см. табл.3.1) и выяснен характер повышения температуры стенки и слоев топлива на различных расстояниях от нее в процессе размораживания.

Таблица 3.1

Сводная таблица результатов опытов

Тепловой поток, Мкал/м <sup>2</sup> *ч	№ опыта	Температура топлива, °С	Время разогрева топлива до + 5 °С, мин		Время до начала повышения температуры стенки	
			слой 20 мм	слой 50 мм	свыше 90 °С	свыше 105 °С
Тощий уголь при рабочей влажности (W = 10,5 ÷ 12 %)						
6 – 6,6	68	-16,3	9,3	20	9	11
4 – 4,4	48	-17,3	12	29	33	37
2,2 – 2,3	49	-15,5	22	81	118	-
Тощий уголь при максимальной влажности (W = 18,8 ÷ 20,4 %)						
6 – 6,6	39	-18,5	16	58	12	36
4 – 4,4	42	-18,5	24	90	> 87	-

Тепловой поток, Мкал/м <sup>2</sup> *ч	№ опыта	Температура топлива, °С	Время разогрева топлива до + 5 °С, мин		Время до начала повышения температуры стенки	
			слой 20 мм	слой 50 мм	свыше 90 °С	свыше 105 °С
2,2 – 2,3	40	-15,6	36	120	> 108	-
Бурый Назаровский уголь при рабочей влажности (W = 36,7 ÷ 37,4 %)						
6 – 6,6	23	-18	11	30	10	16
5 – 5,4	50	-17	15	38	18	> 58
4 – 4,4	53	-20	21	64	> 81	-
3 – 3,4	52	-18	24	70	> 112	-
Бурый Башкирский уголь при рабочей влажности (W = 51,7 ÷ 60 %)						
5 – 5,4	60	-17,2	17	65	14	15
4 – 4,4	58	-16	22	74	14	17
3 – 3,4	59	-15,7	27	82	30	35
Фрезерный торф при рабочей влажности (W = 53,2 ÷ 56,5 %)						
6 – 6,6	61	-18,8	14	36	8	9
4 – 4,4	62	-17,4	25	73	15	17
3 – 3,4	63	-18	25	74	48	53

Особое значение придавалось измерению температуры стенки доньшка сосуда, поскольку стенка имитирует борта вагона, а нагрев борта свыше 90 °С запрещен, чтобы предупредить повреждение окраски.

Слой на расстоянии 20 мм от стенки при рабочей влажности топлива и максимальном тепловом потоке (6000 ккал/(м<sup>2</sup>·ч)) размораживался весьма быстро - в пределах 10 ÷ 14 минут в зависимости от марки топлива. Увеличение влажности топлива от рабочей до максимальной, а следовательно, и количества смерзшейся влаги увеличивает время размораживания. Слой топлива на расстоянии 50 мм от стенки размораживается в 2 ÷ 3,5 раза медленнее, чем слой 20 мм. Длительность

размораживания топлива при определённой влажности и начальной температуре обратно пропорциональна величине теплового потока. Температура металлической стенки в ряде опытов превышала  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  быстрее, чем температура топлива в слое  $20\text{ мм}$  достигала плюс  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При максимальном тепловом потоке  $6000\text{ ккал}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$  и рабочей влажности топлива температура стенки превышала  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  за  $8 \div 10$  минут от начала размораживания.

Это явление, отрицательное с точки зрения сохранности окраски вагона, при размораживании башкирского угля и фрезерного торфа происходило и при меньших тепловых потоках –  $4000 \div 5000\text{ ккал}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ .

В описанных опытах разогревалась нижняя стенка - доньшко сосуда. Для выяснения положения обогреваемой стенки был изготовлен второй опытный сосуд, с боковой металлической стенкой, и излучатели на стенде были повернуты на  $90^{\circ}$ . Сопоставление полученных результатов с прежними показало, что процесс разогрева протекает так же, при близких температурах стенки и топлива.

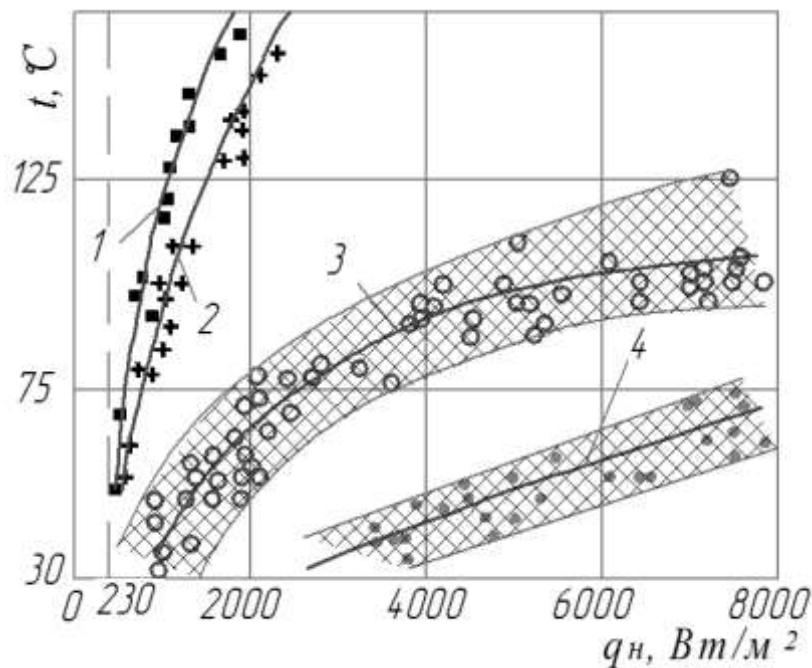
В ВТИ было проведено экспериментальное изучение процесса разогрева слоя топлива для нахождения эмпирических зависимостей и определения времени размораживания [67].

На основании данных эксплуатации, для выгрузки угля из вагона достаточно разогреть сравнительно тонкий слой у стенок и днища вагона -  $10 \div 50\text{ мм}$ . Поскольку вся масса угля не должна прогреваться, процесс можно рассматривать как одномерную задачу нестационарной теплопроводности в теле, ограниченном с одной стороны. Тепло в этом случае распространяется в направлении, перпендикулярном стенке или днищу вагона. Так как в любой точке нагреваемой поверхности скорость распространения теплового потока внутрь угля одинакова и на эту поверхность воздействует равномерный тепловой поток, можно рассматривать только часть этой поверхности с прилегающим к ней углем. Распространение тепла в угле, засыпанном в цилиндр определенных размеров с изолированными боковой поверхностью и одним из торцов, при нагреве другого торца происходит так же, как и у стенки и днища вагона.



Эксперименты были проведены на стенде. Исследуемый уголь загружался в контейнер, замораживался в холодильнике в монолит и затем разогревался.

В процессе разогрева фиксировалось температурное поле в контейнере при различных начальных и граничных условиях. Наибольшее количество опытов было проведено с углем марки АШ, Т, Бикинским, Назаровским, Башкирским, а также с торфом и кварцевым песком. Начальная температура топлива колебалась в пределах (минус 5 ÷ минус 42 °С), плотность теплового потока (230 ÷ 8100 Вт/м<sup>2</sup>), насыпная масса 450 ÷ 1200 кг/м<sup>3</sup>. Для определения режима, при котором температура поверхности в момент размораживания слоя угля 20 мм достигла предельно допустимой величины, равной 90 °С, была построена зависимость температуры стенки в момент окончания размораживания слоя 20 мм от начального удельного теплового потока  $q_n$  (рис. 3.1).



1 - размораживание угля через деревянную стенку толщиной 0,039 м (конечное значение температуры); 2 - размораживание угля через деревянную стенку толщиной 0,039 м (среднее за время размораживания значение температуры); 3 - размораживание угля через металлическую стенку, толщиной 2 ÷ 4 мм (конечное значение температуры); 4 - размораживание угля через металлическую стенку толщиной 2 ÷ 4 мм (среднее за время размораживания значение температуры).

Рис. 3.1. Зависимость температуры поверхности стенки в момент окончания размораживания слоя  $z_0=20$  мм от начального удельного теплового потока.

На основе экспериментальных данных получена методика расчета [51].  
Время размораживания слоя угля было определено из уравнения:

$$Q = \int_0^{\tau_p} q(\tau) d\tau, \text{ кДж/м}^2, \quad (3.1)$$

где  $Q$  - количество тепла, аккумулированное стенкой и углем при размораживании слоя угля толщиной  $Z_0$ , отнесенное к  $1 \text{ м}^2$  поверхности нагрева, ккал/ $\text{м}^2$ ;

$q(\tau)$  - зависимость плотности теплового потока к поверхности от времени;

$\tau_p$  - время размораживания слоя, ч.

Применив теорему Лагранжа, уравнение (3.1) можно записать в виде:

$$Q = q_{\text{ср}} * \tau_p, \text{ кДж/м}^2, \quad (3.2)$$

где  $q_{\text{ср}}$  - среднеинтегральное значение плотности теплового потока за период  $\tau_p$ , Вт/ $\text{м}^2$ .

Из уравнения (3.2) можно найти время размораживания  $\tau_p$ (ч).

Количество аккумулированного тепла определяется из равенства

$$Q = \rho_n z_0 \left[ c_p \frac{t_n}{n_p + 1} + c_3 (0 - t_n)(1 + M) + q_\lambda \right] + c_R \rho_R \left( t_n - t_n' + \frac{t_n' - t_n}{1 + n_R} \right), \text{ кДж} / \text{м}^2 \quad (3.3)$$

где  $\rho_n$  - насыпная масса угля, кг/ $\text{м}^3$ ;

$z_0$  - величина размороженного слоя угля, м;

$c_p$  - теплоемкость размороженного слоя топлива, то есть имеющего температуру больше  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , кДж/(кг $\cdot$  $^\circ\text{C}$ );

$c_3$  - теплоемкость замороженного слоя, то есть имеющего температуру меньше  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , кДж/(кг $\cdot$  $^\circ\text{C}$ );

$t_n$  - температура внутренней поверхности стенки в момент окончания размораживания слоя  $z_0$  (для металлической стенки эта температура определяется из рисунка 3.1),  $^\circ\text{C}$ . Из опытов найдено, что для деревянной стенки  $t_n$

находится в интервале  $15 \div 30$  °С. Нижний предел соответствует удельному начальному тепловому потоку 230, верхний - 2800 Вт/м<sup>2</sup>;

$t'_n$  - температура наружной стенки в момент размораживания слоя  $z_0$  (см. рис. 3.1), °С;

$t_n$  - начальная температура угля, °С;

$n_p$  - показатель степени температурной кривой в размороженном слое угля (при  $q_n = 230 \div 3500$  Вт/м<sup>2</sup>);

$n_p$  может быть принят равным 1,25;

$n_R$  - показатель степени температурной кривой в деревянной стенке (1,5 ÷ 2 - большей плотности теплового потока соответствует большее значение  $n_R$ );

$R$  - толщина стенки, м;

$c_R$  - теплоемкость стенки, кДж/(кг·°С);

$\rho_R$  - удельная плотность стенки, кг/м<sup>3</sup>;

$q_\lambda$  - количество тепла, необходимое для плавления льда, содержащегося в 1 кг размороженного угля, кДж/кг;

$M = z/z_0(n_3+1)$  - безразмерный комплекс, представляющий собой относительную величину прогретого от температуры  $t_n$  до 0 °С слоя угля  $z$ , имеющего показатель степени температурной кривой  $n_3$ .

В первом приближении значение  $M$  может быть найдено по формулам:

- при прогреве через деревянную стенку:

$$M_D = 3 \cdot \frac{(2000 - q_n)^6}{1800} + 1, \quad (3.4)$$

(при  $q_n = 230 \div 2300$  Вт/м<sup>2</sup>)

- при прогреве через металлическую стенку:

$$M_D = 3,3 \cdot \left( \frac{4000 - q_n}{3800} \right)^4 + 0,7, \quad (3.5)$$

(при  $q_n = 230 \div 4650$  Вт/м<sup>2</sup>)

В уравнении (3.2) средний за время размораживания удельный тепловой поток к поверхности нагрева равен:

$$q_{cp} = \kappa \left[ \left( \frac{T_{ИЗЛ}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{II}^{CP}}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{CP} (t_B^{CP} - t_{II}^{CP}), \text{ Вт/м}^2, \quad (3.6)$$

где  $k = 4,9 \cdot \varepsilon_{ПР} \cdot \varphi_{12} \cdot \frac{F_1}{F_2}$  - коэффициент, зависящий от геометрического

расположения  $\varphi_{12}$  и физических свойств взаимодействующих поверхностей  $F_1$  и  $F_2$  (для размораживающих устройств при расположении излучателей на расстоянии габарита строения от поверхностей вагона он находится в интервале  $1 \div 3$ ; меньшее значение справедливо для днища, большее – для бортов, промежуточное – для торцов вагона);

$T_{ИЗЛ}$  – температура излучающей поверхности,  $^{\circ}\text{К}$ ;

$T_{II}^{CP}$  и  $t_{II}^{CP}$  – средняя температура поверхности за период размораживания  $\tau_p$  (см. рис. 3.1),  $^{\circ}\text{С}$ ;

$\alpha_{CP}$  – коэффициент теплоотдачи от нагретого воздуха к поверхности вагона, определяемый по обобщённой формуле, рекомендуемой М. А. Михеевым [69].

для случая обтекания воздушным потоком пластины  $\alpha = 0,023 \frac{\lambda}{l^{0.2}} \left( \frac{\nu}{\nu} \right)^{0.8}$ ,

$\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{С})$ ;

$t_B^{CP}$  – средняя температура воздушной струи, набегающей на поверхность вагона, определяемая по формуле Абрамовича Г. Н. [10],  $^{\circ}\text{С}$ .

В статье [74] проводится исследование процесса нагрева угля в конвективном размораживающем устройстве на основе численной трехмерной модели. По результатам исследования получены температуры деталей вагона и груза, а так же выводы по оптимальному углу обдуваемого потока для конкретной модели размораживающее устройство.

Существует проблема, связанная с трудностью определения состояния замороженного груза при постановке на разогрев. Величина промерзания будет за-

висеть от многих факторов: среднесуточная температура воздуха, продолжительность транспортирования, прочность смерзания груза, влажность груза и объемная плотность груза.

Согласно существующей технологии продолжительность разогрева груза определяется по нормативным данным, установленным с учетом температуры окружающей среды и продолжительности нахождения вагонов с грузом в пути следования [38]. Проведенный сопоставительный анализ нормативной и фактической продолжительности разогрева показал существенные расхождения этих величин [76]. Только в 25 % случаев нормативная и фактическая продолжительность разогрева совпадают, в 63 % случаев расхождение составляет 1...6 часов, а в 12 % случаев расхождение 6 часов и более. Это происходит из-за того, что при установлении нормативов брались усредненные данные не соответствующие конкретным условиям эксплуатации.

### **3.2 Основные уравнения описывающие распространение тепла при разогреве угля в размораживающих устройствах**

Всю область размораживающего устройства участвующую в переносе тепла можно разделить на две части. Первая - это воздух, "жидкая" среда, перенос тепла в этой области осуществляется за счет естественной тепловой конвекции. Вторая область - это вагон с углем - "твердая" область. Здесь тепло переносится за счет теплопроводности. Поскольку нагревательные элементы имеют достаточно высокую температуру необходимо дополнительно учитывать перенос тепла за счет теплового излучения. Широкое распространение получило применение численного моделирования процессов естественной конвекции для решения прикладных задач для охлаждения электроники [4], [9], отоплении и вентиляции помещений [2], [5], [70], интенсификации теплообмена в энергетическом оборудовании [7], [12], [14], [64], [96].

Для расчета температуры, давления и двух составляющих (для плоской двумерной задачи) вектора скорости в текучей среде необходимо решить систему из четырех дифференциальных уравнения:

- дифференциальное уравнение переноса энергии в текучей среде (уравнение Фурье-Кирхгофа);

- два дифференциальных уравнения переноса импульса в текучей среде (уравнения Навье-Стокса);

- дифференциальное уравнение неразрывности или сплошности.

Дифференциальное уравнение Фурье-Кирхгофа:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{w} \nabla T = \lambda \nabla^2 T + q_v + \mu \Phi - p \nabla \vec{w} \quad (3.7)$$

где  $\rho$  - плотность среды;

$C_p$  - изобарная теплоемкость;

$T$  - абсолютная температура;

$t$  - время протекания процесса;

$w$  - вектор скорости;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности среды;

$q_v$  - плотность теплового потока за счет внутреннего тепловыделения;

$\mu$  - динамический коэффициент вязкости;

$\Phi$  - диссипативная функция для учёта перехода энергии упорядоченного движения в энергию неупорядоченного движения (тепловую);

$p$  - давление среды;

$\nabla$  - оператор набла (Гамильтона).

Первое слагаемое в уравнении (3.7), отражает нестационарность процесса теплообмена, второе учитывает перенос теплоты за счет движения среды (конвекции), третье учитывает перенос теплоты за счет теплопроводности, четвертое слагаемое учитывает поступление или убыль энергии за счет действия внутренних источников или стоков теплоты, пятое учитывает нагрев среды вследствие дисси-

пации кинетической энергии движения за счет трения, шестое учитывает изменение энергии элемента при его сжатии или расширении.

Внутренние источники тепла, для решаемой задачи теплообмена в размораживающем устройстве, отсутствуют. Поэтому четвертое слагаемое будет равно нулю. Последние два слагаемых в уравнении зависят в основном от скорости движения и для малых скоростей, характерных для естественной конвекции, в расчетах теплообмена ими можно пренебречь. В результате, уравнение (3.7) примет следующий вид:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{w} \nabla T = \lambda \nabla^2 T \quad (3.8)$$

При записи уравнения Навье-Стокса используется приближение Буссинеска [11], [25], [102], которое учитывает линейную зависимость плотности от температуры только при вычислении массовой силы, создающей свободную конвекцию. Во всех остальных частях уравнения плотность остается постоянной:

$$\rho_0 \left( \frac{\partial \vec{w}}{\partial t} + \vec{w} \nabla \vec{w} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{w} + \rho_0 g \frac{(T - T_0)}{T_0} \quad (3.9)$$

где  $\rho_0$  - плотность среды в начальный момент времени;

$T_0$  - температура среды в начальный момент времени;

$g$  - ускорение свободного падения;

остальные параметры согласно уравнения (3.7).

В уравнении (3.9) первое слагаемое характеризует нестационарность и имеет смысл локальной силы, второе слагаемое характеризует силу инерции, третье слагаемое характеризует давление, четвертое слагаемое характеризует процессы связанные с трением, пятое слагаемое характеризует подъемную силу за счет разности плотностей.

При постоянстве плотности, следующей из приближения Бусинеска, уравнение неразрывности можно записать в следующем виде:

$$\nabla \vec{w} = 0 \quad (3.10)$$

Уравнения (3.8-3.10) дают систему уравнений, описывающую тепловую конвекцию в приближении Буссинеска.

Уравнение распространения тепла в твердом теле для нестационарного процесса записывается следующим образом [57], [45], [75]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q_v \quad (3.11)$$

Подвод тепла к прогреваемому грузу от нагревательных элементов (регистров с паром) помимо конвекции производится излучением через слой разделяющего поверхности воздуха. При переносе теплоты излучением необходимо учитывать нестационарность процесса [89], взаимное расположение взаимодействующих поверхностей и т.д [88], [94]. В общем случае плотность теплового потока за счет излучения [35] между двумя поверхностями рассчитывается по формуле:

$$q_{12} = \sigma \cdot \varphi_{12} \cdot \varepsilon_{np} \cdot [T_1^4 - T_2^4] \quad (3.12)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) - постоянная Стефана-Больцмана;

$\varphi_{12}$  - угловой коэффициент, учитывающий долю лучистого потока достигающей нагреваемой поверхности;

$\varepsilon_{np}$  - приведенная степень черноты;

$T_1, T_2, K$  - температуры излучающей (паровые регистры) и лучепринимающей (вагон) поверхности.

Размораживание угля сопровождается рядом физических процессов, одним из которых является перераспределение в них влажности вследствие миграции воды под действием градиента температур. Из исследования полей влажности в массе перевозимых в железнодорожных вагонах грузов следует, что миграция влаги по направлению к поверхности и боковым стенкам вагона не превышает 1-2% от первоначальной [54], [63]. Решение задачи разогрева угля связано со значительными трудностями, так как размораживание угля характеризуется процессом нестационарной теплопроводности с изменением агрегатного состояния части вещества, переносом тепла и жидкости. На все это накладывается нестационар-



ный процесс нагрева воздуха внутри размораживающего устройства, а так же условия обтекания нагретым воздухом вагона, под действием естественной конвекции. При разработке численной модели приняты следующие допущения:

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

### 3.3 Начальные и граничные условия

Основные геометрические размеры соответствуют размерам размораживающего устройства (рис. 3.2). Задача решается в двухмерной постановке [3]. Область  $\Omega_1$  характеризует уголь, в котором распространяется тепло. В области  $\Omega_1$  решается уравнение теплопроводности. В области  $\Omega_2$  (воздух в размораживающем устройстве) решается система уравнений для естественной конвекции в приближении Бусинеска, описывающая распределением скоростей и температур воздуха. Область  $\Omega_3$  характеризует металлическую стенку вагона, в этой области решается уравнение теплопроводности. Область  $\Omega_4$  и  $\Omega_5$  характеризует металлическое колесо вагона и его наполнение смазочным материалом (полное колесо), в этих областях решается уравнение теплопроводности.

На границах 1,2,3 задаются граничные условия первого рода, характеризующие температуру нагревательных элементов - паровых регистров  $t_r$ ,  $^{\circ}\text{C}$ . На границе 4 задаются адиабатные условия. На границе 5 задаются граничные условия первого рода, характеризующие температуру поверхности  $t_{\text{пов}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ . На границе 6

задаются условия симметрии расчетной области, граница 6 является осью симметрии для указанной расчетной области. На границе 7, 8, 9 задаются граничные условия четвертого рода. На границе областей  $\Omega_2$  и  $\Omega_4$ ,  $\Omega_4$  и  $\Omega_5$  задаются граничные условия четвертого рода.

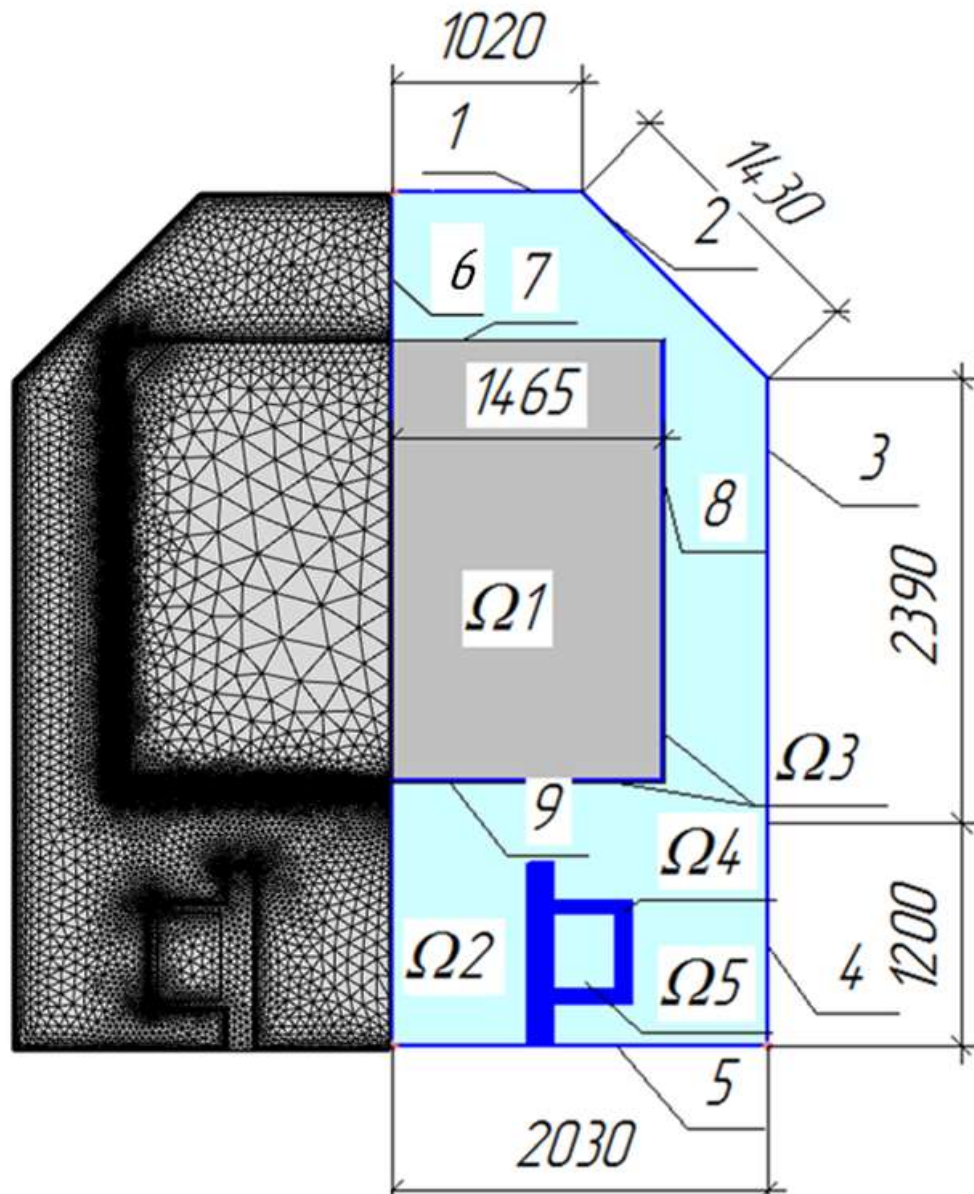


Рис. 3.2 Геометрия расчетной области и расчетная сетка

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.

Начальные условия для всех областей ( $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4, \Omega_5$ ) заданы одинаковыми, соответствующими начальной температуре груза  $t_0, ^\circ\text{C}$ .

Параметры воздуха (плотность, теплоемкость и вязкость) брались из справочной литературы [95].

Металлическая стенка вагона и колесо (области  $\Omega_3, \Omega_4$ ) имели следующие параметры: плотность -  $7850 \text{ кг/м}^3$ , теплоемкость -  $475 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ , коэффициент теплопроводности -  $44,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  [81].

Смазочный материал области  $\Omega_5$  задавался следующими величинами: плотность -  $903 \text{ кг/м}^3$ , теплоемкость -  $1980 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ , коэффициент теплопроводности -  $0,135 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  [101].

Теплофизические характеристики угля (область  $\Omega_1$ ) варьируются в широких пределах и зависят от множества параметров (марка угля, температура, влажность, гранулометрический состав и др). В работе [13] для каменного угля установлены основные параметры, такие как теплоемкость  $C_{p,\text{уг}}$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{уг}}$  и плотность  $\rho_{\text{уг}}$ . В таблице 3.2 представлены значения коэффициента температуропроводности  $a_{\text{уг}}$  от плотности угля, его влажности и температуры.

Таблица 3.2

Температура, $^\circ\text{C}$		Влажность, %				
		2	4	6	8	10
$t = 0^\circ\text{C}$	Плотность, $\text{кг/м}^3$	Теплоемкость, Дж/(кг·град)				
		979,5	1038,1	1080,0	1121,8	1159,5
	Коэффициент температуропроводности, $(\text{м}^2/\text{с})\cdot 10^{-6}$					
	700	0,1568	0,1739	0,1911	0,2058	0,2225
	850	<b>0,1446</b>	0,1598	0,1761	0,1903	0,2059
	900	0,1541	0,1703	0,1867	0,2027	0,2192
	1000	0,1510	0,1673	0,1839	0,1993	0,2158

Температура, °C	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Влажность, %				
		2	4	6	8	10
t= -10 <sup>0</sup> C	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, Дж/(кг·град)				
		975,3	1008,8	1050,7	1088,4	1130,2
	Коэффициент температуропроводности, (м <sup>2</sup> /с)·10 <sup>-6</sup>					
	700	0,1574	0,1790	0,1964	0,2122	0,2282
	850	0,1452	0,1644	0,1810	0,1961	0,2112
	900	0,1548	0,1752	0,1919	0,2089	0,2249
	1000	0,1516	0,1722	0,1890	0,2054	0,2214
t= -20 <sup>0</sup> C	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, Дж/(кг·град)				
		971,2	1004,6	1038,1	1080,0	1121,8
	Коэффициент температуропроводности, (м <sup>2</sup> /с)·10 <sup>-6</sup>					
	700	0,1581	0,1797	0,1988	0,2138	<b>0,2299</b>
	850	0,1458	0,1651	0,1832	0,1976	0,2128
	900	0,1554	0,1759	0,1942	0,2105	0,2265
	1000	0,1523	0,1729	0,1913	0,2070	0,2230

Полученный массив данных можно обобщить, принимая во внимание, что на процесс разогрева будут влиять не отдельные параметры (теплоёмкость, коэффициент теплопроводности и т.д.), а совокупность этих параметров, приводящая к изменению коэффициента температуропроводности. Из таблицы 3.2 следует, что при большом разнообразии все значения коэффициента температуропроводности укладываются в диапазон от 0,1446 до 0,2299[(м<sup>2</sup>/с)·10<sup>-6</sup>]. Среднее значение коэффициента температуропроводности составляет 0,187 [(м<sup>2</sup>/с)·10<sup>-6</sup>]. В результате для расчета выбраны три угля с соответствующими значениями коэффициента температуропроводности: минимум, среднее значение и максимум. Параметры угля принятые, при численном моделировании, приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Наименование	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).	Коэффициент температуропроводности, (м <sup>2</sup> /с)·10 <sup>-6</sup>
Уголь 1	850	979,5	0,1204	0,1446
Уголь 2	900	1080	0,1814	0,1867
Уголь 3	700	1130,2	0,1806	0,2299

Режим течения воздуха возле нагретых тел, вызванный естественной конвекцией, может быть как ламинарный, так и турбулентный [52]. Для определения режима течения, при свободной конвекции, необходимо знать число Рэлея [93]. Для исследуемых параметров число Рэлея составило:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot a} = \frac{9,8 \cdot 3,7 \cdot 10^{-3} \cdot 127 \cdot 2,5^3}{19,4 \cdot 10^{-6} \cdot 27,8 \cdot 10^{-6}} \approx 1,3 \cdot 10^{11}; \quad (3.13)$$

где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения;

$\beta$  - температурный коэффициент объемного расширения воздуха, для газов при небольшом давлении можно рассчитать как:

$$\beta = \frac{1}{273 + T_0} = \frac{1}{273 - 2} = 3,7 \cdot 10^{-3}, \quad \text{К}^{-1} \quad (3.14)$$

$\Delta T = (T_c - T_0)$  - разница температур между стенкой ( $T_c = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и теплоносителем ( $T_0 = -2 \text{ }^\circ\text{C}$ );

$L = 2,5 \text{ м}$  - характерный размер соответствующий высоте борта вагона;

$\nu = 19,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  - коэффициент кинематической вязкости, для воздуха при средней температуре между  $T_c$  и  $T_0$ ;

$a = 27,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  - коэффициент температуропроводности для воздуха при средней температуре между  $T_c$  и  $T_0$ .

По данным работы [84] развитое турбулентное течение наступает при числах  $Ra \geq 6 \cdot 10^{10}$ .

В качестве замыкающей модели турбулентности при расчетах использовалась стандартная  $k$ - $\epsilon$  модель [50] 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 неравномерная сетка с использованием треугольных элементов с 5-ю тетраэдральными слоями в пристенной области, для разрешения пограничного слоя. Решение производилось методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS.

### **3.4 Корректировка расчетной температуры паровых регистров**

При создании расчетной модели не учитывались потери тепла в окружающую среду. В реальном размораживающем устройстве потери тепла в окружающую среду через стенки присутствуют. Наличие потерь тепла приводит к снижению температуры воздуха внутри размораживающего устройства. В результате, при наличии потерь тепла в размораживающем устройстве, появляется недогрев воздуха до температуры нагревательных элементов. При расчете температура воздуха фактически будет стремиться к температуре нагревательных элементов, поскольку отсутствует охлаждение за счет потерь тепла. Для сопоставления расчетных режимов с результатами экспериментов необходимо внести корректировку, позволяющую сопоставлять результаты расчета с экспериментом. Задаваемая для расчета температура нагревательных элементов должна быть меньше экспериментальной на определенную величину недогрева. Для оценки зависимости скорректированной температуры от действительной температуры нагревательных элементов были выполнены расчеты (с разной начальной температурой) и полученные результаты нанесены на график экспериментальных зависимостей, показывающих температуру воздуха в верхней части размораживающего устройства (рис 3.3). На рисунке 3.3 нанесены линии характеризующие температуру насыщенного пара  $t_{нас}$  и расчетную температуру нагревательных элементов  $t_r$  от давления пара в нагревательных элементах  $P_p$ . В результате совпадения температуры воздуха в верхней части размораживающего устройства по данным эксперимента и численного моделирования, получены значения расчётной температуры  $t_r$  в

нагревательных элементах (сплошная линия на рис 3.4) от фактического давления пара  $P_n$  в нагревательных элементах.

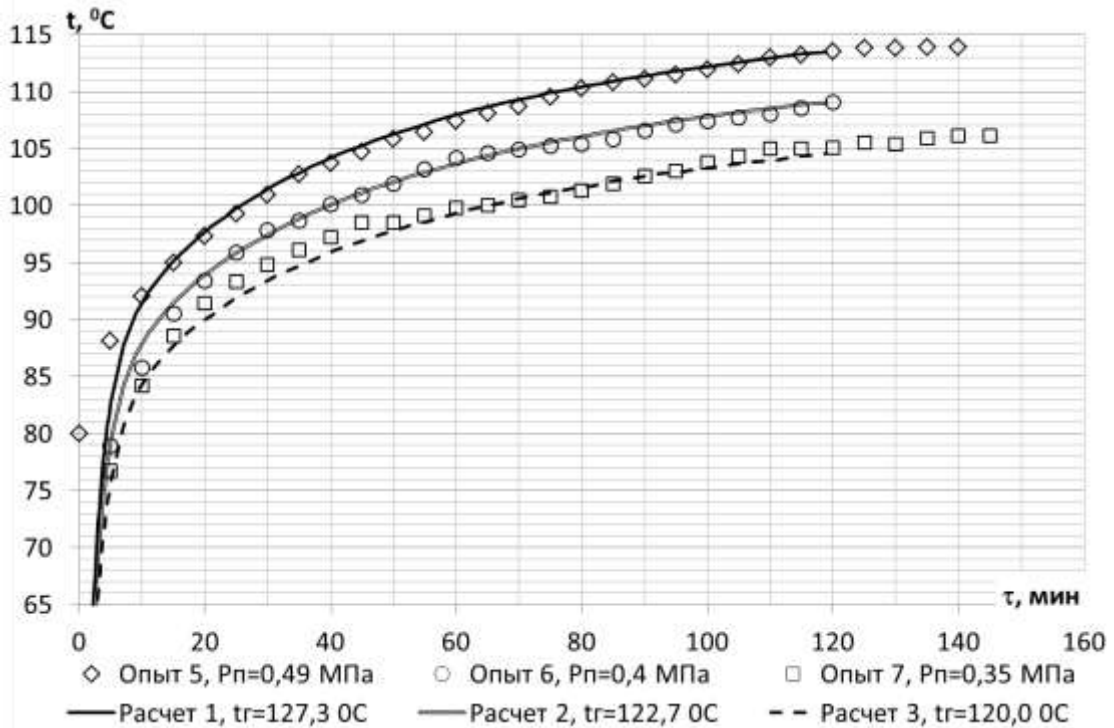
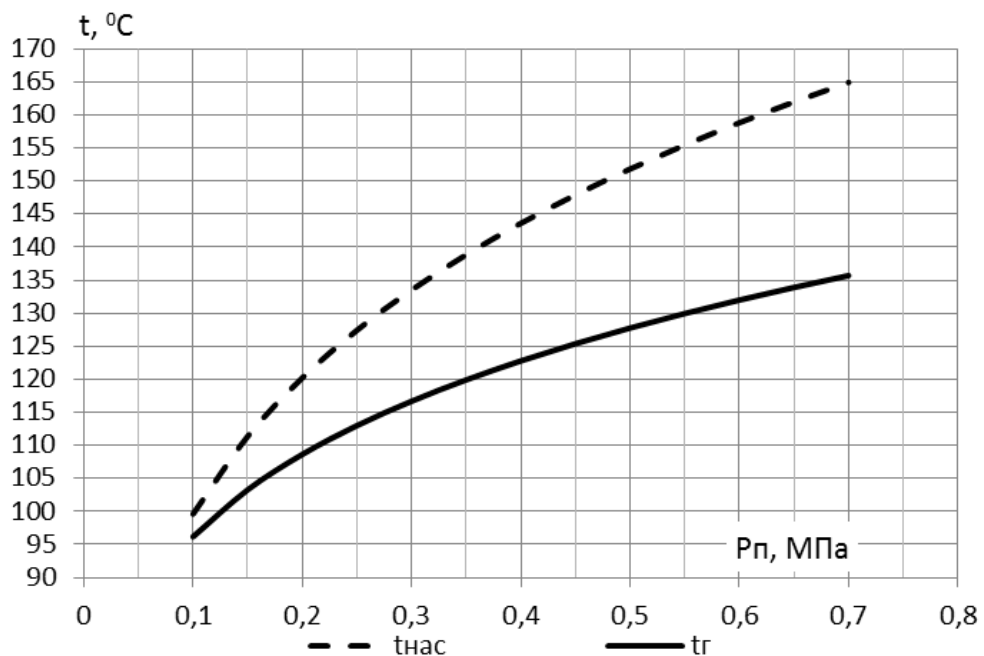


Рис. 3.3. Температура воздуха вверху размораживающего устройства при разном давлении пара в нагревательных элементах от времени разогрева.



$t_{нас}$  - температура насыщения при давлении пара  $P_n$ ;

$t_r$  - расчетная температура в нагревательных элементах при давлении пара  $P_n$ .

Рис. 3.4. Расчетная температура нагревательных элементов от давления пара подаваемого на нагревательные элементы.

Уравнение аппроксимации для определения расчетной температуры нагревательных элементов  $t_r$  от давления пара в нагревательных регистрах  $P_n$  имеет следующий вид:

$$t_r = 144,45 \cdot P_n^{0,177} \quad (3.15)$$

где  $t_r$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] - температура нагревательных элементов - паровых регистров, задаваемая как исходные данные при моделировании;

$P_n$  [МПа] - давление пара подаваемого на греющие панели размораживающего устройства.

Задаваясь давлением пара, идущего в паровые регистры размораживающего устройства, можно рассчитать температуру нагревательных элементов  $t_r$ , которая будет исходной при численном моделировании. Например, при давлении пара  $P_n = 0,5$  МПа расчетная температура нагревательных элементов используемая при численном моделировании составит  $t_r = 127,77$   $^{\circ}\text{C}$ .

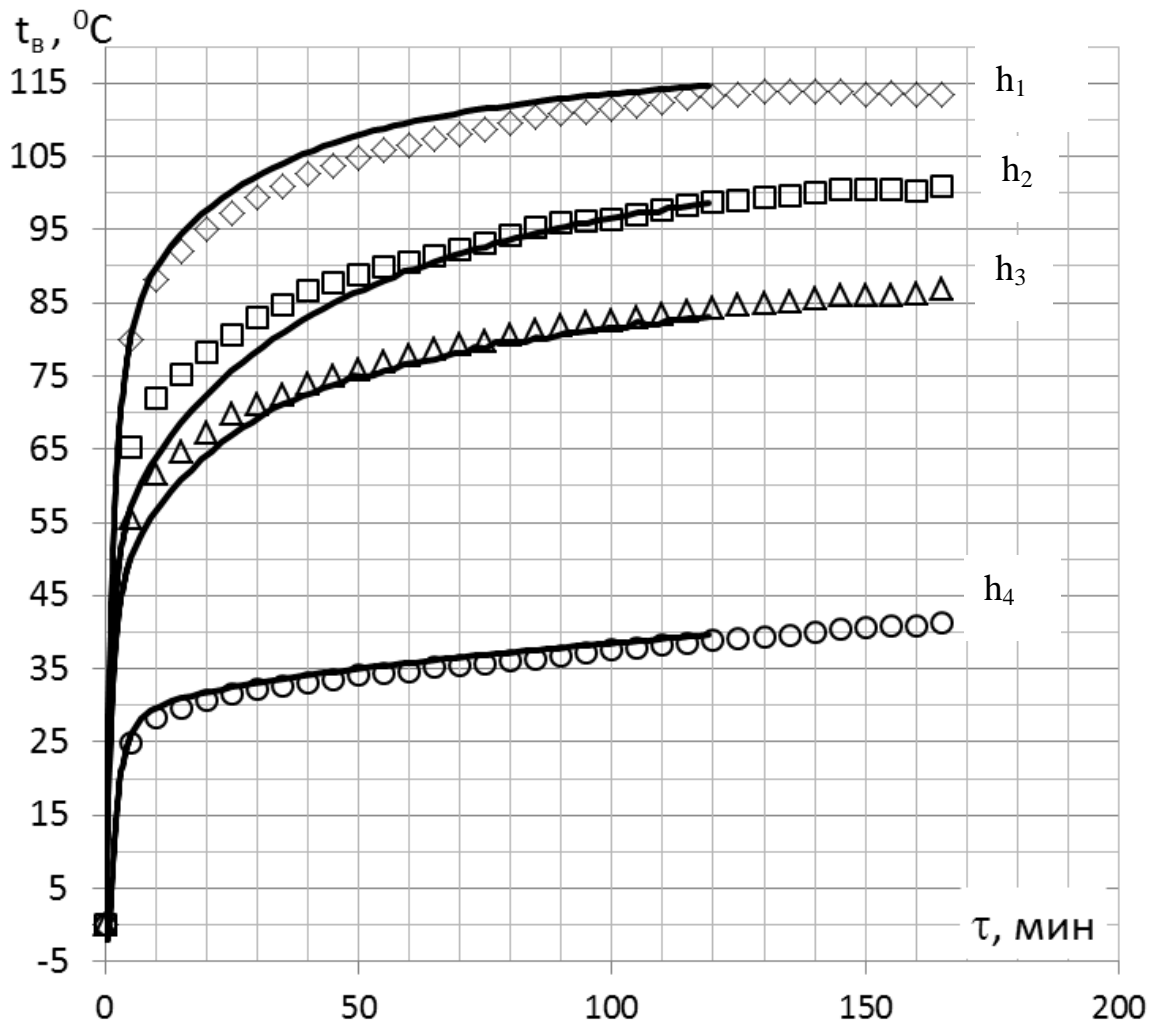
С ростом давления пара в нагревательных элементах  $P_n$  увеличивается перепад между температурой насыщения  $t_{\text{нас}}$  и расчетной температурой нагревательных элементов  $t_r$ . Это объясняется тем, что с ростом температуры насыщения, т.е. фактической температуры греющих элементов, увеличиваются и тепловые потери в окружающую среду.

### **3.5 Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными**

Для проверки адекватности разработанной численной модели выполнено сопоставление расчетных данных с результатами эксперимента. В качестве критериев сопоставления выбраны несколько параметров. Первый параметр - это температура воздуха  $t_b$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] внутри размораживающего устройства на разной высоте с течением времени (рис.3.5). Линией на рисунке 3.5 показаны результаты моделирования, точками - результаты экспериментальных исследований. Как видно из рисунка 3.5 имеется хорошее соответствие между результатом эксперимента и расчетом. Поскольку данный параметр характеризует температурное поле по вы-



соте размораживающего устройства, то это подтверждает правильность расчетов при моделировании переноса теплоты за счет конвекции.



Высота расположения датчика измеряющего температуру воздуха внутри размораживающего устройства

$$h_1 - 3,7 \text{ м}; h_2 - 2,3 \text{ м}; h_3 - 1,7 \text{ м}; h_4 - 0,5 \text{ м}$$

Рис. 3.5. Температура воздуха внутри размораживающего устройства на разной высоте от времени разогрева.

Второй параметр  $t_{\text{подш}} [^{\circ}\text{C}]$  - температура поверхности подшипника (рис.3.6). Как видно из рисунка рис.3.6 наблюдается хорошее совпадение результатов численного моделирования и экспериментального исследования. Это подтверждает достоверность расчетов распространения теплоты за счет теплопроводности в области твердого тела.

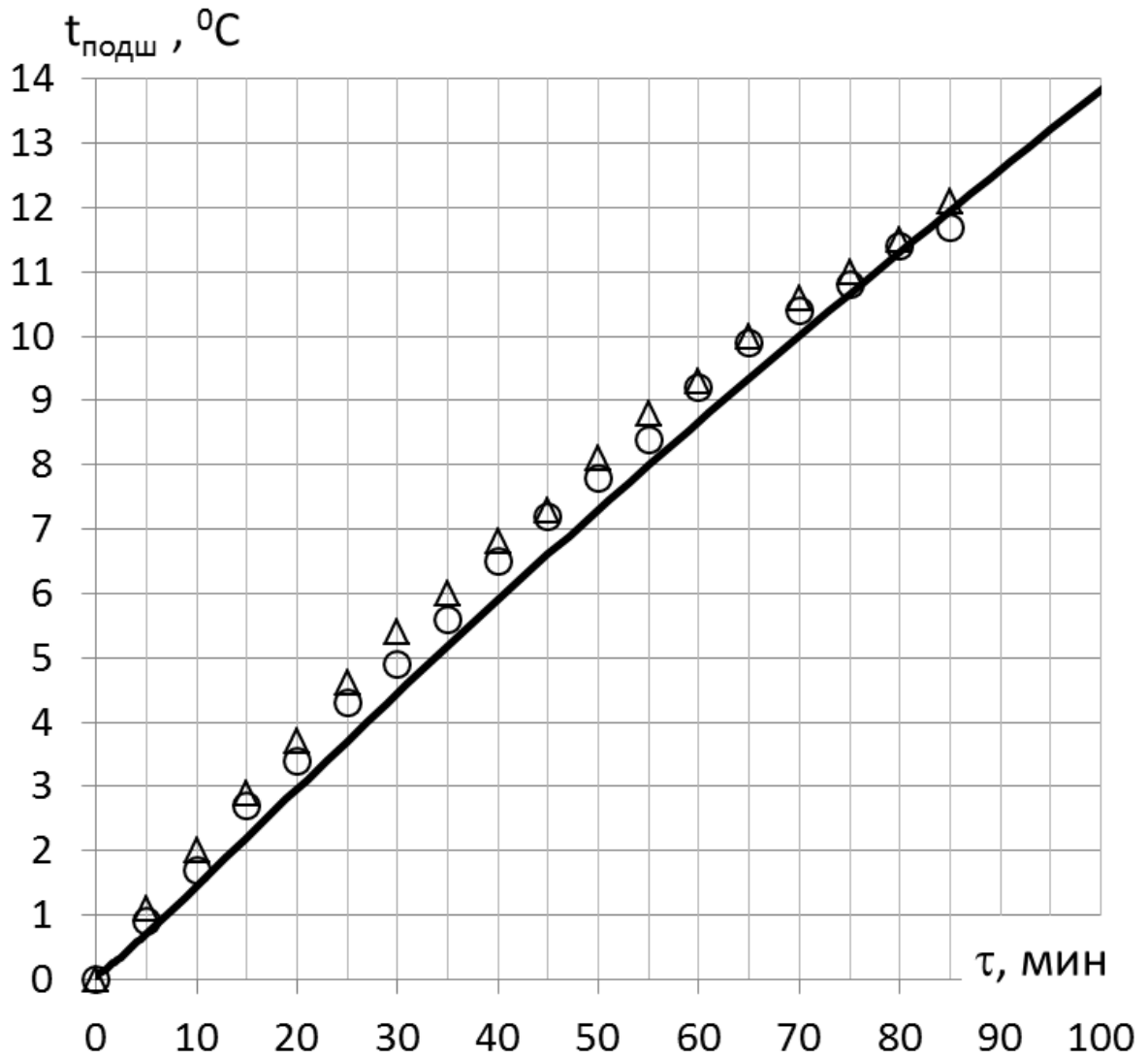


Рис. 3.6. Температура корпуса подшипника от времени разогрева

Третий параметр  $t_{\text{уг}}$  [ $^\circ\text{C}$ ] - температура угля, совпадение говорит о правильности описания процесса распространения теплоты в слое угля в разработанной модели (рис. 3.7). На рис. 3.7 видно хорошее совпадение результата расчета и экспериментальных данных.

В целом по результатам сопоставления можно сделать вывод о хорошем совпадении результатов численного моделирования с экспериментальными данными и можно использовать разработанную модель для исследования процесса теплообмена при разогреве угля в размораживающих устройствах.

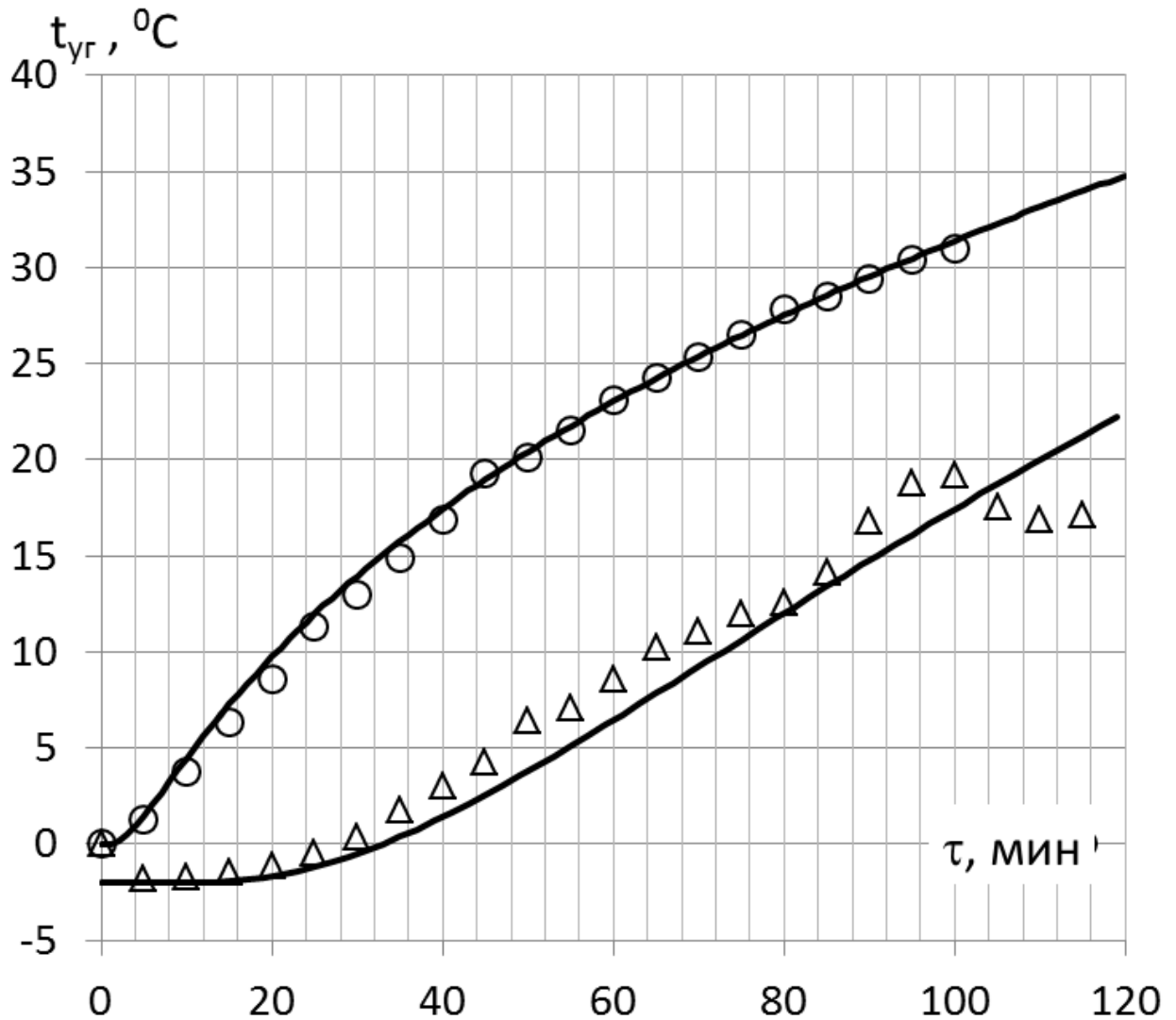


Рис. 3.7. Температура угля (двух разных углей) от времени разогрева

На рисунке 3.7 приведено поле скоростей 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 2.16).

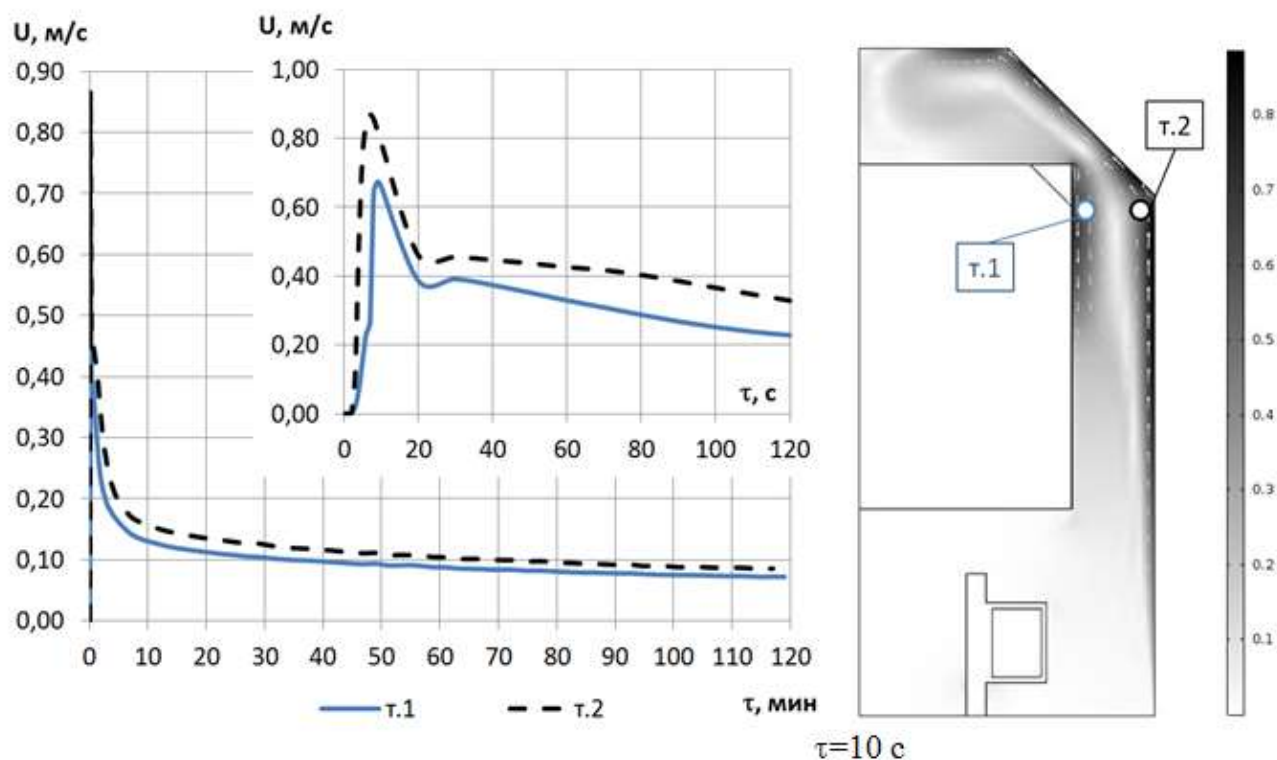


Рис. 3.8. Скорость движения воздуха в характерных точках

## Глава 4. Повышение эффективности работы теплоэнергетического оборудования угольных терминалов

### 4.1 Влияние температуры пара на работу размораживающего устройства

На рисунке 4.1 показана температура металлической стенки вагона в верхней части  $t_{мет}$  и угля на глубине 50 мм  $t_{уг}$  при разных температурах пара в нагревательных элементах  $t_{нас} = 165; 148; 131$  и  $115$  °С, что соответствует давлению  $P_{п} = 0,7; 0,45; 0,28$  и  $0,17$  МПа при  $t_0 = -20$  °С. По оси абсцисс приведено время в минутах, по оси ординат - температура в градусах Цельсия.

Верхняя пунктирная горизонтальная линия обозначает  $t_{мет} = 90$  °С, максимальную для металлической стенки вагона. Нижняя горизонтальная пунктирная линия обозначает температуру угля  $t_{уг} = 5$  °С. Это температура при которой процесс разогрева угля можно считать окончанным. При разных температурах нагревательных элементов  $t_r$ , а значит и пара подаваемого в паровые регистры, уголь не всегда успевает нагреться раньше до температуры  $t_{уг} = 5$  °С, чем стенка вагона

нагреться до  $t_{мет} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Например, при температуре нагревательных элементов  $t_{нас} = 165\text{ }^{\circ}\text{C}$ , стенка быстрее нагревается до  $t_{мет} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 4.1 т.А), чем уголь успевает нагреться до  $t_{уг} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 4.1 т.Б). Соответственно режим с температурой  $165\text{ }^{\circ}\text{C}$  не является безопасным по условиям перегрева металлической стенки вагона. Режим с температурой нагревательных элементов  $t_r = 131\text{ }^{\circ}\text{C}$  всегда обеспечивает безопасный нагрев угля.

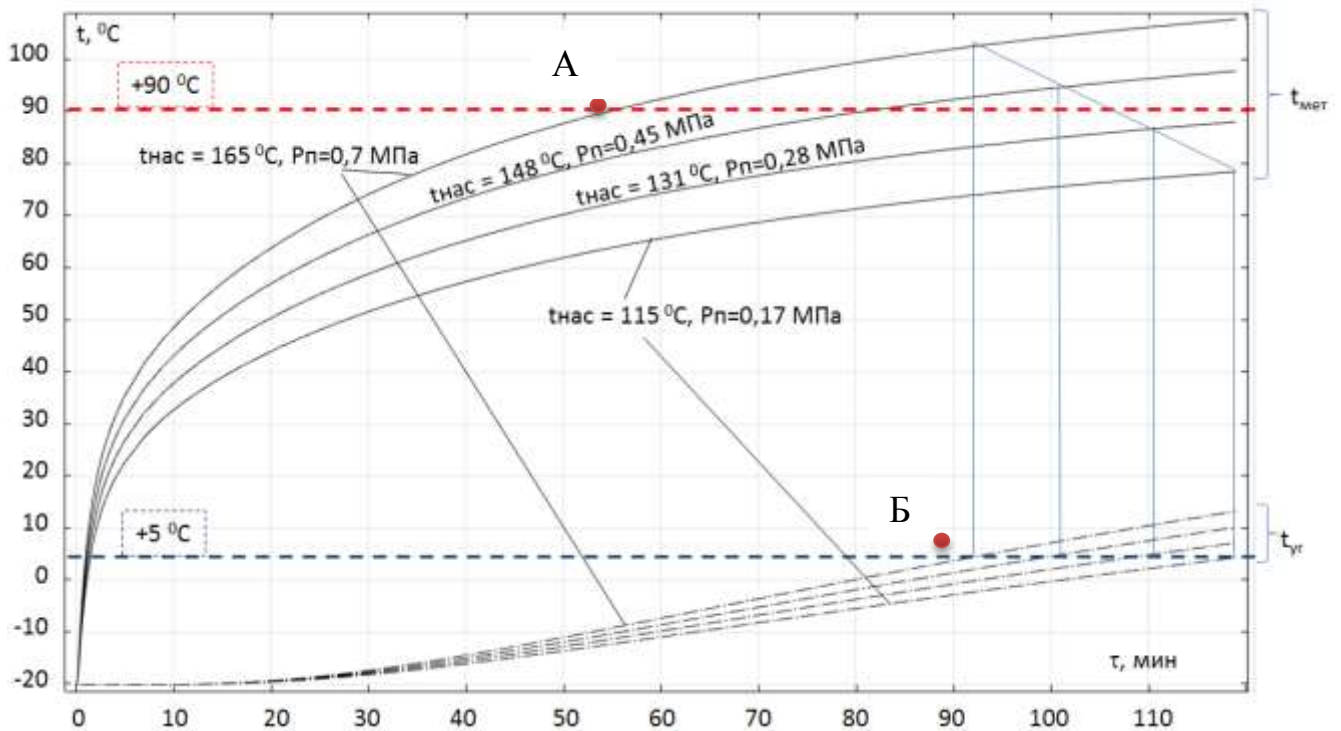


Рис. 4.1. Диаграмма нагрева угля и стенки металла при разной температуре нагревательных элементов

На рисунке 4.2. показано время необходимое для нагрева угля на глубине 50 мм до температуры  $t_{уг} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Линиями обозначены разные начальные температуры угля  $t_0$ . Хорошо видно, что увеличение температуры нагревательных элементов  $t_{нас}$  позволяет сократить время нагрева на 20-30%. При этом для более холодного угля, с начальной температурой  $t_0 = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  эффект сокращения времени от увеличения температуры нагревательных элементов  $t_r$  больше, чем для угля с начальной температурой  $t_0 = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

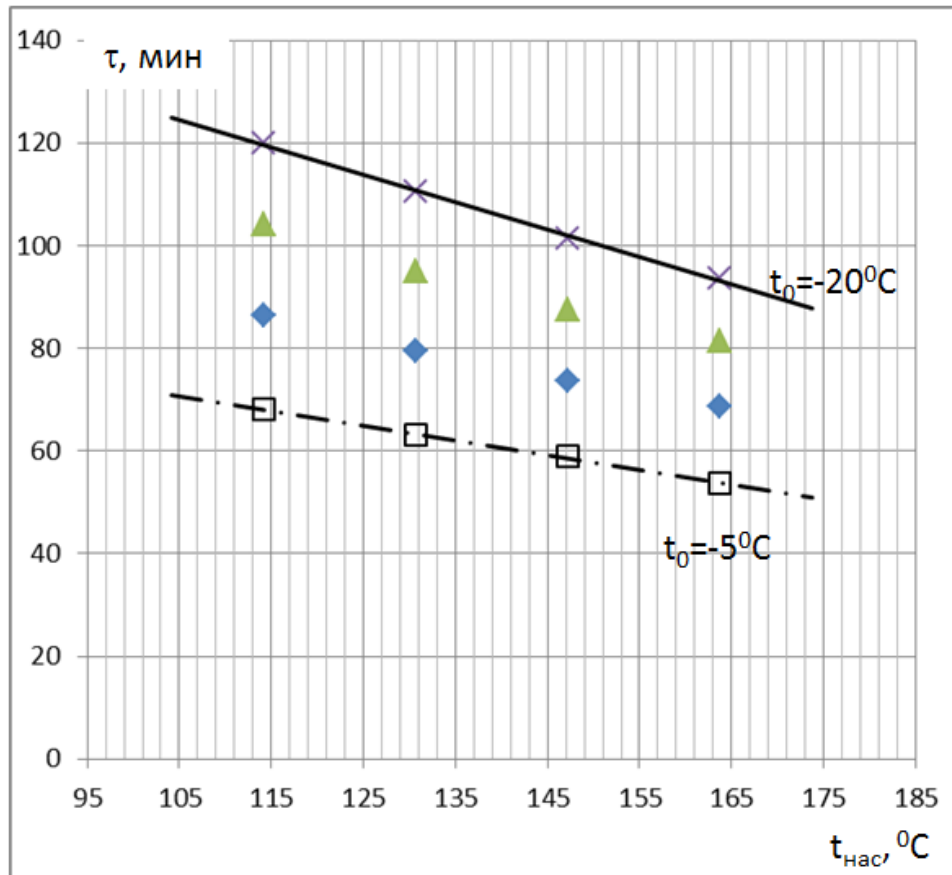


Рис. 4.2. Время необходимое для нагрева угля до температуры  $+5^\circ\text{C}$  от температуры нагревательных элементов

На рис. 4.3 приведена зависимость времени нагрева температуры металлической стенки вагона в верхней части до предельной температуры  $t_{мет} = 90^\circ\text{C}$  от температуры нагревательных элементов  $t_{нагр}$ . С ростом температуры нагревательных элементов  $t_{нагр}$ , безопасное время пребывания вагона в размораживающем устройстве сокращается. При этом для более холодного угля, с температурой  $t_0 = -20^\circ\text{C}$  безопасное время нагрева больше, чем для угля с температурой  $t_0 = -5^\circ\text{C}$ .

Если рисунки 4.2 и 4.3 нанести на одни координаты, то получится график, с помощью которого можно определить продолжительность нагрева и безопасную температуру нагревательных элементов обеспечивающих минимальное время разогрева без риска повреждения вагонов.

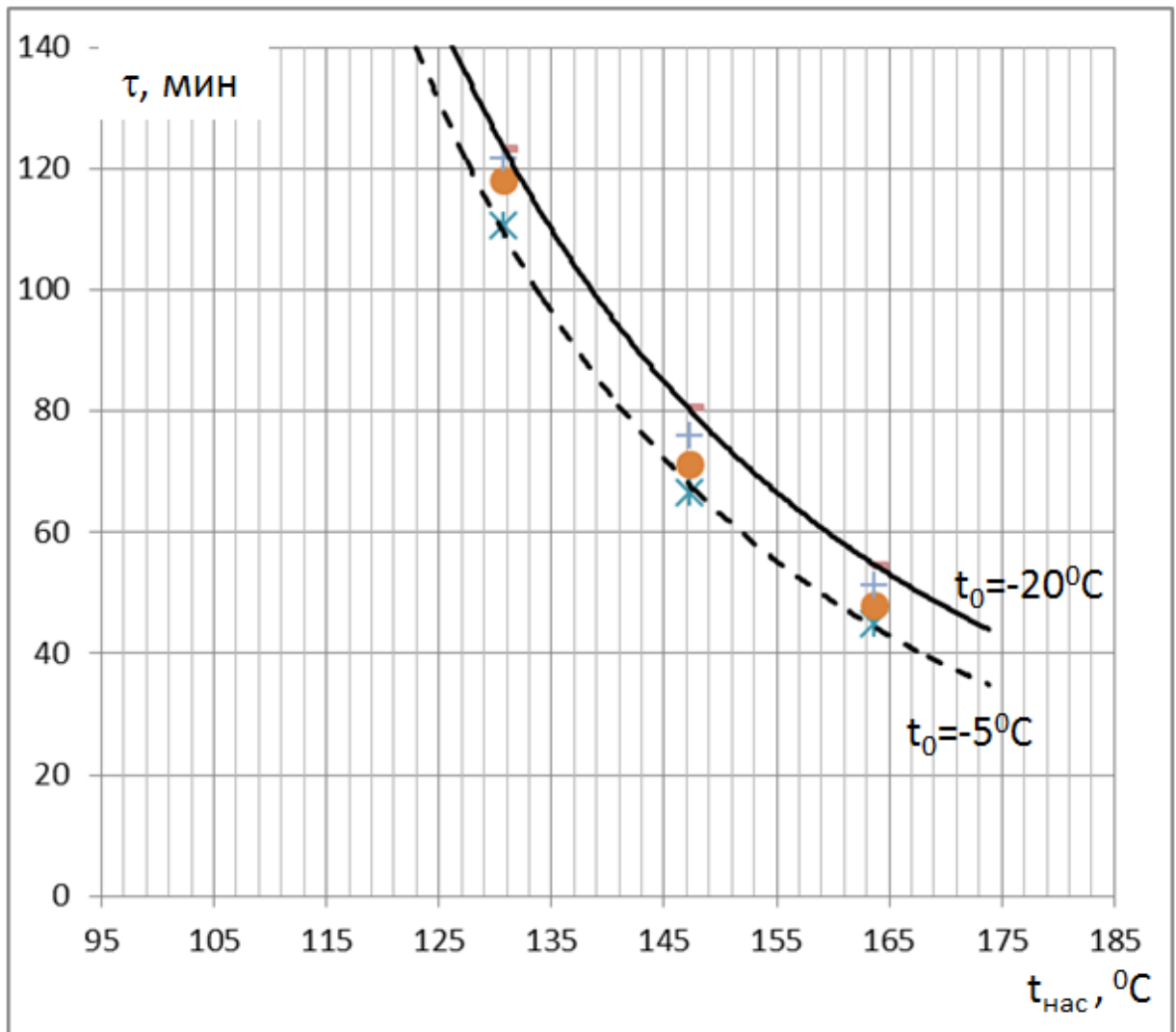


Рис. 4.3. Время необходимое для нагрева стенки вагона до температуры  $t_{мет}=90^{\circ}\text{C}$  от температуры нагревательных элементов

На рисунке 4.4, на пересечении линий нагрева угля до  $t_{уг}=+5^{\circ}\text{C}$  и температуры стенки вагона до  $t_{мет}=90^{\circ}\text{C}$  получается продолжительность нагрева угля и безопасная температура нагревательных элементов, при условии постоянства этой температуры в течении всего процесса нагрева. В результате получаем, что при начальной температуре угля  $t_0=-20^{\circ}\text{C}$  время нагрева составит 108 минут, а безопасная температура нагревательных элементов  $t_{нас}=135,7^{\circ}\text{C}$ , что соответствует давлению пара в нагревательных элементах  $P_{п}=0,32$  МПа. При начальной температуре угля  $t_0=-5^{\circ}\text{C}$  время нагрева составит 58 минут, а безопасная температура нагревательных элементов  $t_{нас}=153,8^{\circ}\text{C}$  или давление пара  $P_{п}=0,526$  МПа.

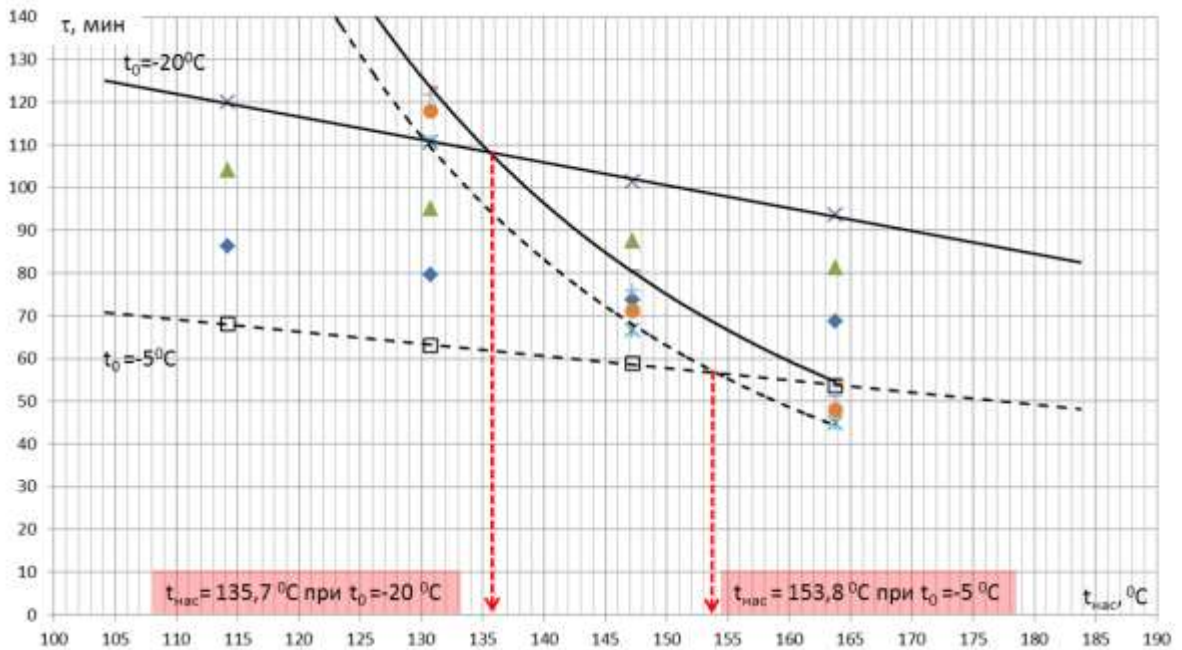


Рис. 4.4. Диаграмма определения безопасной температуры пара в нагревательных элементах от температуры нагревательных элементов

## 4.2 Влияние характеристик угля на скорость разогрева

Основной теплотехнической характеристикой угля, влияющей на процесс нагрева, является коэффициент температуропроводности. Для большинства углей значение коэффициента температуропроводности лежит в пределах от 1,45 до 2,23  $[(\text{м}^2/\text{с}) \cdot 10^{-7}]$ . Результаты расчётов процесса нагрева угля при разном коэффициенте температуропроводности приведены на рисунке 4.5. Пунктиром обозначены линии для коэффициента температуропроводности  $a_{\text{уг}} = 1,45 [(\text{м}^2/\text{с}) \cdot 10^{-7}]$ , сплошная линия для коэффициента температуропроводности  $a_{\text{уг}} = 2,23 [(\text{м}^2/\text{с}) \cdot 10^{-7}]$ . Кривые показывают время нагрева температуры стенки до опасного значения  $t_{\text{мет}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ , прямые линии соответствуют времени нагрева угля до температуры  $t_{\text{уг}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Из рисунка видно, что с понижением коэффициента температуропроводности увеличивается время разогрева. Помимо этого, понижение коэффициента температуропроводности приводит к ухудшению отвода тепла от металлической стенки вагона, в результате температура стенки растёт быстрее, даже при одинаковой температуре нагревательных элементов  $t_{\text{нас}}$  (пунктирная кривая находится



ниже, чем сплошная). В результате увеличение времени разогрева обусловлено не только ухудшением проводимости тепла внутри угля, но так же и необходимостью снижать температуру нагревательных элементов из-за опасности перегрева металлической стенки.

Так, для угля с коэффициентом температуропроводности  $a_{\text{уг}} = 1,45$   $[(\text{м}^2/\text{с}) \cdot 10^{-7}]$  предельная температура пара в паровых регистрах при которой не происходит перегрев стенки вагона составит  $t_{\text{нас}} = 111$   $^{\circ}\text{C}$ , что соответствует давлению пара в паровых регистрах  $P_{\text{п}} = 0,15$  МПа. Время разогрева составит 155 минут, что на 30 % больше, чем время разогрева для угля с  $a_{\text{уг}} = 2,23$   $[(\text{м}^2/\text{с}) \cdot 10^{-7}]$ .

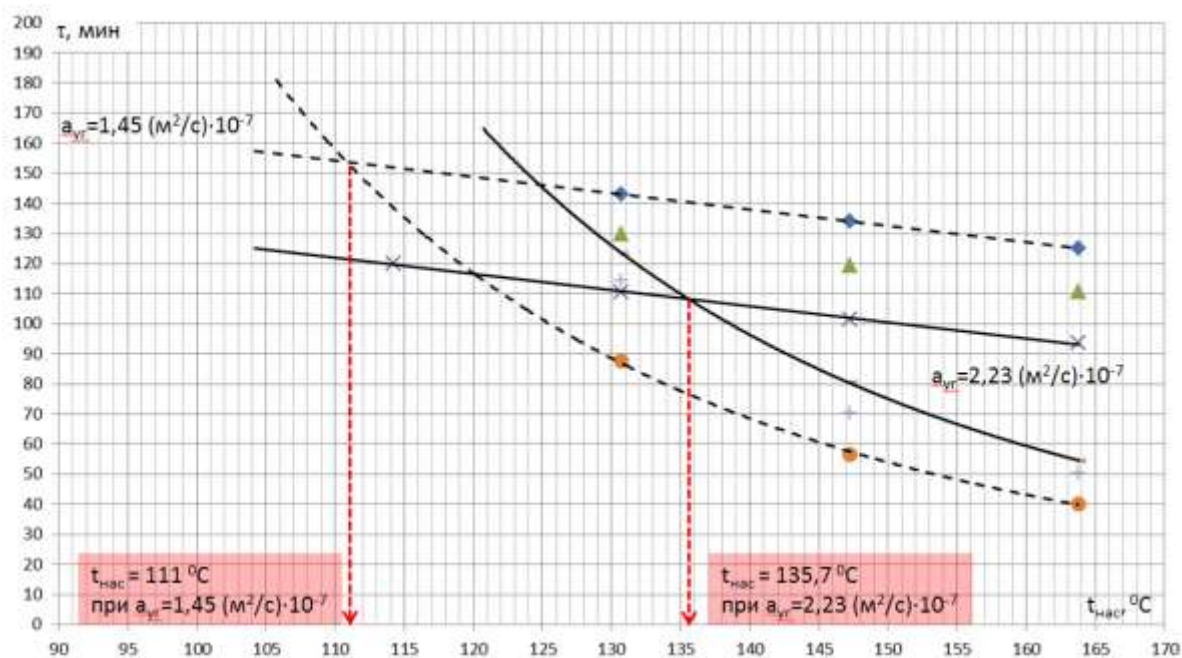


Рис. 4.5. Диаграмма определения безопасной температуры пара в нагревательных элементах от коэффициента температуропроводности угля

На рисунке 4.6 приведены данные по времени разогрева угля от коэффициента температуропроводности угля. Время разогрева в зависимости от значения коэффициента температуропроводности угля хорошо аппроксимируется линейной зависимостью:

$$\tau = -58,924 \cdot a + 241,83 \quad (4.1)$$

где  $\tau$  - время разогрева, мин;

$a$  - коэффициент температуропроводности,  $(\text{м}^2/\text{с}) \cdot 10^{-7}$ .

Снижение коэффициента температуропроводности приводит к ухудшению теплоотвода от металлической стенки вагона. Снижения оттока тепла от металлической стенки приводит к её более быстрому разогреву. Для сохранения температуры металлической стенки в условиях безопасных температур необходимо снижать температуру нагревательных элементов, что приводит к увеличению и без того возрастающего времени разогрева слоя угля.

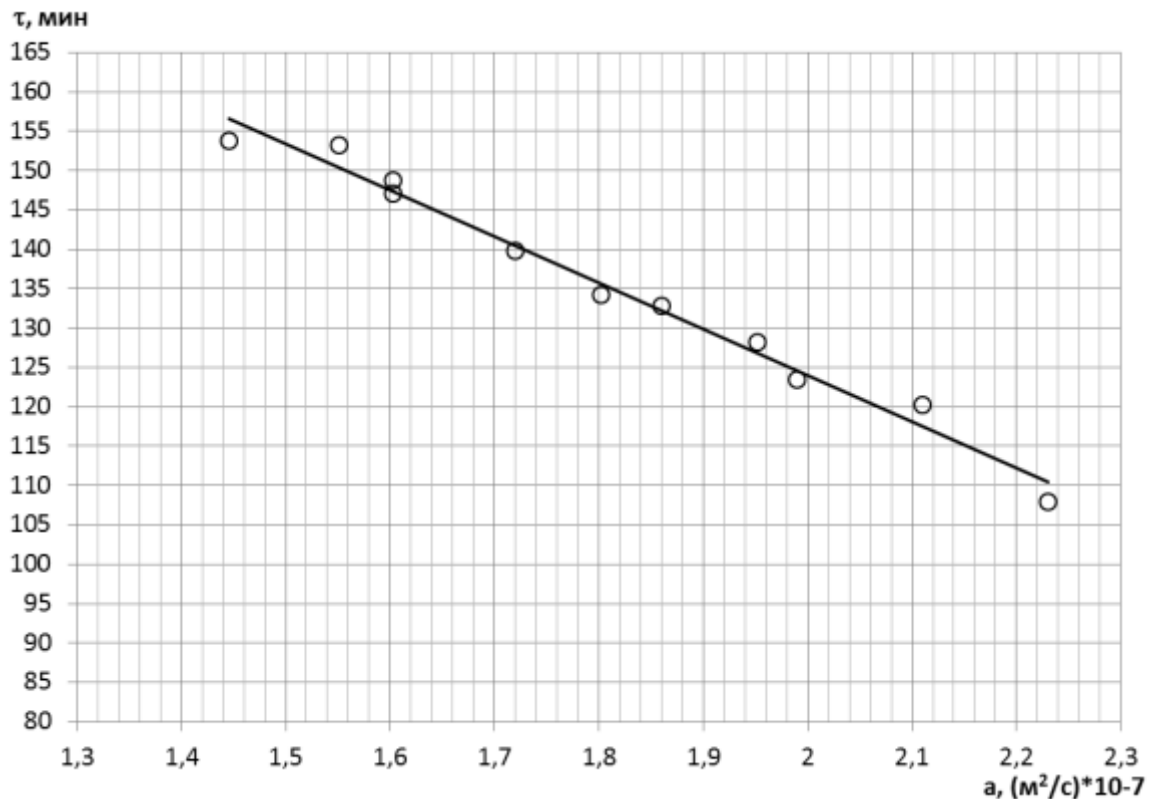


Рис. 4.6. Диаграмма определения времени нагрева угля от температуропроводности угля

Полученное безопасное давление пара в нагревательных элементах (рис. 4.7) (т.е. давление пара при которой разогрев угля до температуры  $+5$  °С происходит быстрее, чем стенка нагревается до  $+90$  °С) от коэффициента температуропроводности угля хорошо аппроксимируется линейной зависимостью и имеет следующий вид:

$$P_{\text{п}} = 0,1502 \cdot a + 0,0443 \quad (4.2)$$

где  $P_{\text{п}}$  - давление греющего пара при котором не происходит перегрева стенки вагона при разогреве угля с соответствующим  $a$ , МПа;

$a$  - коэффициент температуропроводности,  $(\text{м}^2/\text{с}) \cdot 10^{-7}$ .

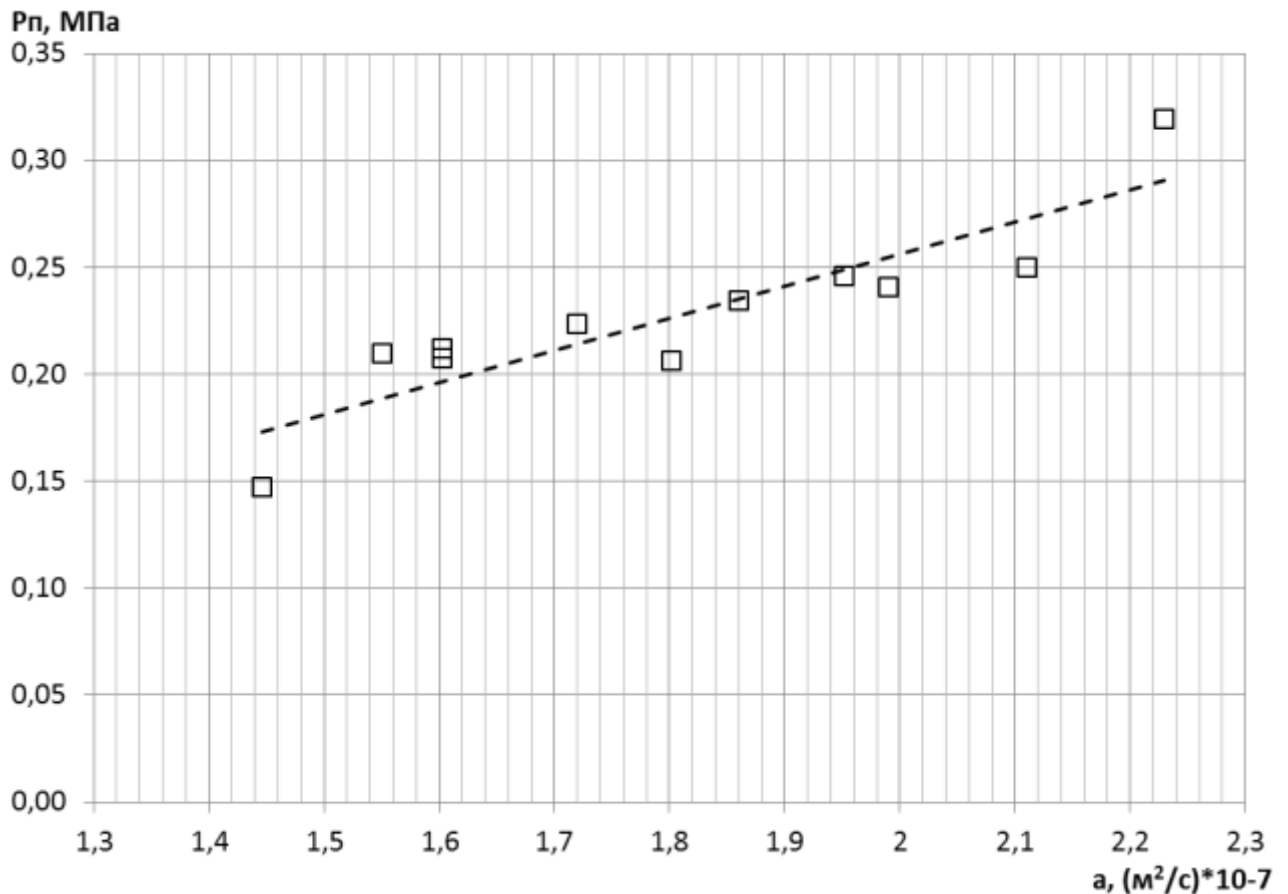


Рис. 4.7. Диаграмма определения безопасного давления пара в нагревательных элементах от температуропроводности угля

### 4.3 Влияние переменной температуры пара в нагревательных элементах на время разогрева

При разогреве угля в размораживающем устройстве с постоянной температурой нагревательных элементов существуют определенные ограничения на максимальную температуру нагревательных элементов, и как следствие на минимальное время разогрева. Это вызвано тем, что при повышении температуры нагревательных элементов рост температуры металлической стенки в верхней части опережает рост температуры угля. В результате, при определенной температуре нагревательных элементов, стенка нагревается быстрее до предельной температуры, чем уголь до необходимой температуры. Этот процесс подробно описан в параграфе 4.1 настоящей диссертации.

Для снижения времени разогрева угля при сохранении безопасных условий для вагона предлагается проводить разогрев при переменной температуре пара в нагревательных элементах. В начальный момент времени нагрев происходит с максимально возможной температурой, а по мере нагрева стенки вагона до опасного значения, снижать температуру нагревательных элементов до безопасного значения. В результате теплота, полученная в начальный момент времени при больших градиентах температуры, позволит сократить время общее время нагрева.

При переменной температуре нагревательных элементов возможно два варианта: температура в процессе нагрева изменяется непрерывно (имеется некоторая функциональная зависимость температуры от времени) и температура изменяется дискретно (два или более ступенчатых изменений температуры с определенным шагом по времени). Вариант с непрерывно изменяющейся температурой будет давать максимальное снижение времени разогрева, но такой вариант сложно реализуем на практике. Дискретное изменение температуры на практике легко реализуется. Вагон устанавливается в размораживающее устройство, давление в паровых нагревательных элементах поднимается до максимально-возможного. Через определенное время давление пара снижается до безопасного и вагон выдерживается оставшееся время до полного разогрева угля. Для решения данной задачи требуется задать предельные, максимально-возможные значения давлений пара в паровых нагревателях. Эксплуатационное давление в размораживающем устройстве не превышает давления  $P_n = 0,6$  МПа. Технически на размораживающее устройство можно подать максимальное давление пара с величиной  $P_n = 1,3$  МПа, т.к. котлы имеют номинальное давление пара в барабане  $P_6 = 1,4$  МПа. Эти два давления ( $P_n = 0,6$  МПа и  $P_n = 1,3$  МПа) выбраны для расчёта при оптимизации режимов. Сопоставление будет производиться с исходным режимом, при котором температура пара в нагревательных элементах не изменяется. За исходный режим взят нагрева угля с  $a_{\text{уг}} = 2,23 [(m^2/c) \cdot 10^{-7}]$ . Для такого угля максимальная безопасная температура нагревательных элементов (рис. 4.5) составила  $t_{\text{нас}} = 135,7$

$^{\circ}\text{C}$ , что соответствует давлению пара  $P_{\text{п}}=0,32$  МПа, а время разогрева угля составило 108 минут. Режим 1 будет соответствовать начальному давлению пара в паровых регистрах  $P_{\text{п}} = 0,6$  МПа, режим 2 начальному давлению  $P_{\text{п}} = 1,3$  МПа. На рисунке 4.8 приведены результаты расчета для исходного режима и двух режимов с переменной температурой нагревательных элементов.

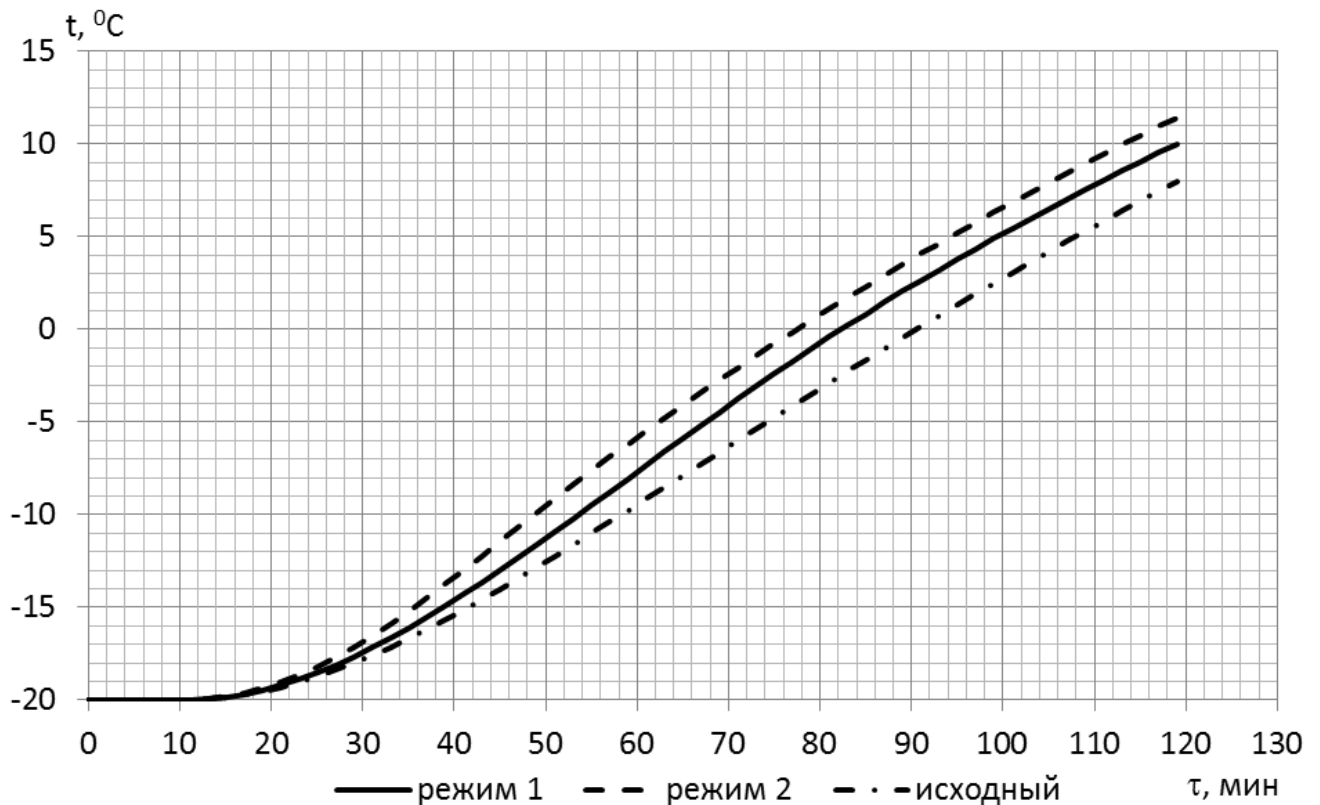


Рис. 4.8. Нагрев угля при разных режимах работы размораживающего устройства

В режиме 1 при  $P_{\text{п}}=0,6$  МПа и температуре пара в нагревательных элементах  $t_{\text{нас}} = 162,0$   $^{\circ}\text{C}$  производился разогрев вагонов в течение 55 минут с дальнейшим понижением температуры пара в нагревательных элементах до  $t_{\text{нас}} = 127,4$   $^{\circ}\text{C}$ , что соответствует давлению  $P_{\text{п}} = 0,25$  МПа. В режиме 2 давление пара составляло  $P_{\text{п}}=1,3$  МПа, температуре пара в нагревательных элементах  $t_{\text{нас}} = 191,6$   $^{\circ}\text{C}$ . Производился разогрев вагонов в течении 30 минут с дальнейшим понижением температуры пара в нагревательных элементах до  $t_{\text{нас}} = 133,5$   $^{\circ}\text{C}$ , что соответствует давлению  $P_{\text{п}} = 0,3$  МПа. При заданных режимах нагрев угля происходил быстрее, чем стенка вагона перегревалась относительно предельной температуры. Снижение

времени разогрева угля по сравнению с исходным режимом с постоянной температурой нагревательных элементов составил: для режима 1 - 8,5 минут или 7,9 %, для режима 2 - 13,7 минут или 12,7 %. Следует отметить, что сокращения количества теплоты при переменном режиме разогрева не происходит. Сокращение времени разогрева связано с увеличением плотности теплового потока в начальный период (рис. 4.9), что позволяет передать большее количество теплоты за меньший промежуток времени.

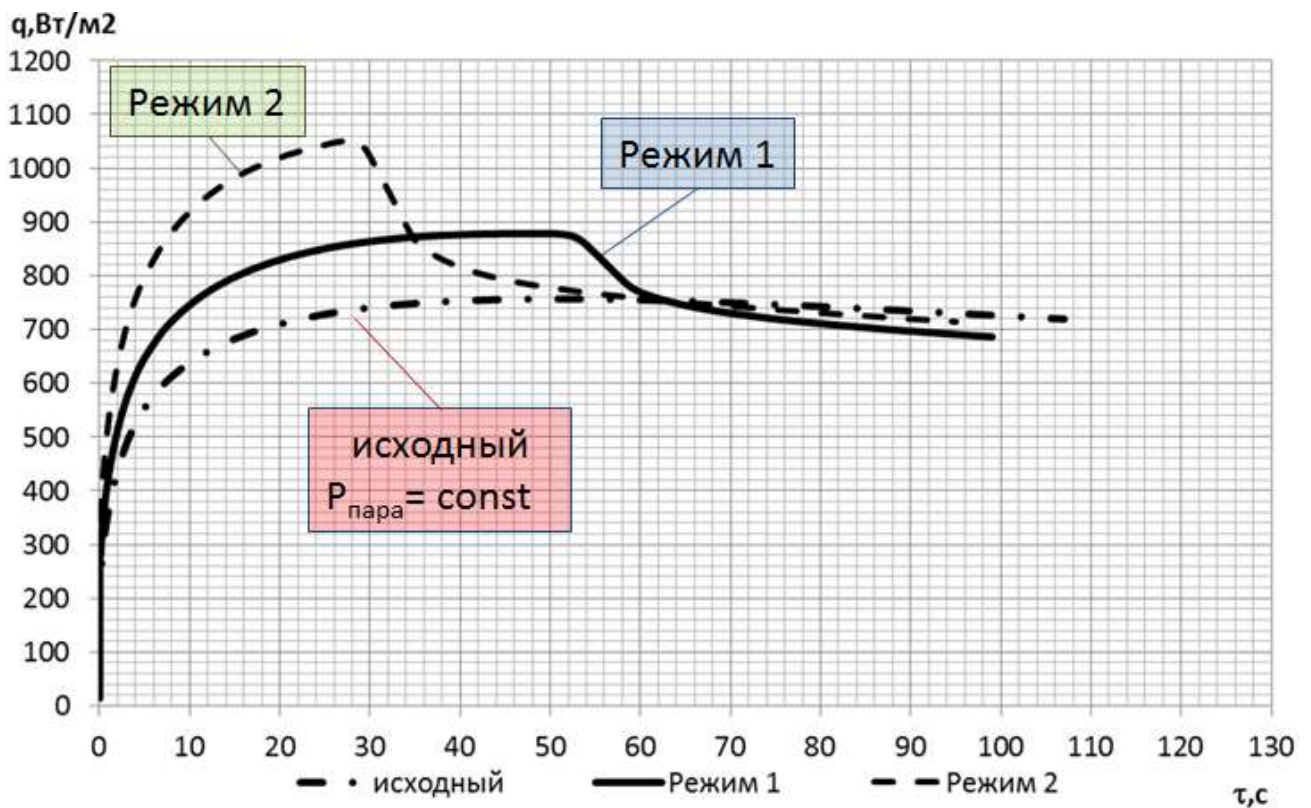


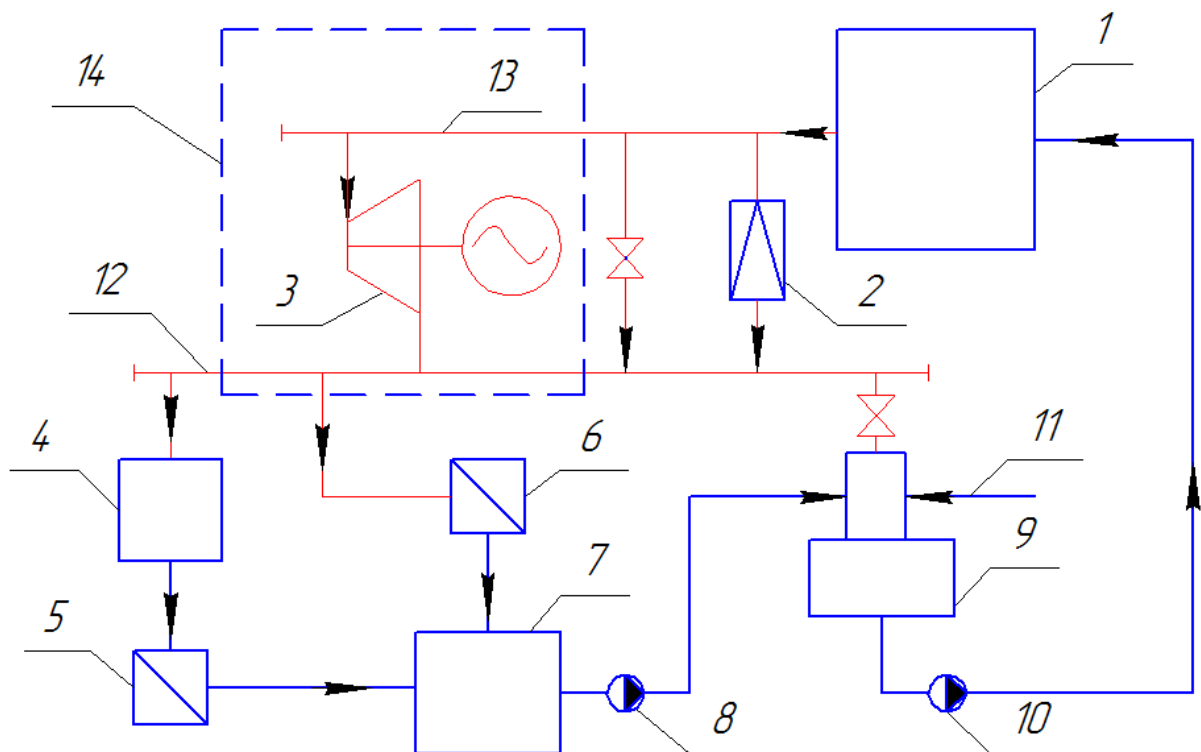
Рис. 4.9. Плотность теплового потока при разных режимах разогрева

#### 4.4 Установка турбин противодавления на котельной угольного комплекса

Существующая схема организации разогрева смерзшегося угля в вагонах предполагает основной разогрев вагонов в 4-х радиационно-конвективных размораживающих устройствах тупиковой конструкции, рассчитанных на одновременный разогрев 80 вагонов. Если в результате длительных маневровых работ уголь в вагонах начинает смерзаться, то его дополнительно подогревают на входе в вагонопрокидыватели в специально установленных 2-х разогревающих устройствах

радиационного типа, рассчитанных на одновременный разогрев двух вагонов каждый. В качестве греющих элементов используются электрические нагреватели. Мощность каждого радиационного размораживающего устройства составляет 1240 кВт.

На котельной угольного терминала АО "Восточный порт" установлены паровые котлы с давлением  $P_6=1,4$  МПа. Давление пара используемое в размораживающем устройстве, а так же в пароводяных подогревателях на бойлерной не превышает  $P=0,6$  МПа. В результате необходимо снижать давление пара приходящего с котлов в редуцирующем устройстве, перед использованием на основных потребителях. Это приводит к необратимым потерям энергии на дросселирование. На рис. 4.10 приведена принципиальная схема установки турбины противодействия в тепловую схему котельной.



1- паровой котел; 2 - редуцирующее устройство; 3 - паровая турбина; 4 - вагоноразмораживатели №1÷4; 5 - отопительный бойлер №1; 6 - отопительный бойлер №2; 7 - бак сбора конденсата; 8 - конденсатный насос; 9 - деаэрактор; 10 - питательный насос; 11 - линия подпитки; 12 - паровой коллектор 0,4÷0,6 МПа; 13 - паровой коллектор 1,4 МПа; 14 - новое оборудование.

Рис. 4.10. Принципиальная тепловая схема котельной

Насыщенный пар от котла с давлением  $P_6=1,4$  МПа подается на турбину противодавления. На выходе из турбины давление пара составляет  $P_2=0,4\div 0,6$  МПа. В результате давление снижается до необходимого, а разница давлений позволяет получить электроэнергию [72], [73], [16], [18], [46].

Турбины противодавления, работающие на насыщенном паре, имеют низкий внутренний КПД. Связано это с большими потерями при работе на влажном паре и низким располагаемым теплоперепадом. Наибольшую номенклатуру паровых турбин с противодавлением, работающих на насыщенном паре, выпускает ОАО "Калужский турбинный завод". Производством турбин малой мощности занимаются так же ООО «Ютрон – Паровые турбины», ООО «Электротехнический альянс», ОАО «Электротехническая корпорация». Основные типы турбин, подходящие по параметрам к существующей схеме котельной угольного терминала приведены в таблице 4.1. Турбины п.1÷7 - ОАО "Калужский турбинный завод", п.8 - ООО «Ютрон – Паровые турбины», п. 9 - ООО «Электротехнический альянс», п. 10 - паровая роторная машина производства ОАО «Электротехническая корпорация».

Таблица 4.1

№ пп	Марка ТГ	$N_3$ , МВ т	$G_0$ , т/ч	$P_0$ , МП а	$P_2$ , МП а	$d_0$ , кг/(кВт*ч)	$\eta_{oi}$ , %
1	ТГ 0,6ПА/0,4 P13/6	0,6	30,4	1,3	0,6	14,1	55,16
2	ТГ 1,5А/10,5 P13/3	1,5	34,5	1,3	0,3	6,4	66,74
3	ТГ 0,5ПА/0,4 P11/6	0,5	27,5	1,1	0,6	15,3	64,64
4	ТГ 0,75ПА/0,4 P13/4	0,75	22,5	1,3	0,4	8,3	62,60
5	ТГ 0,5А/0,4 P13/3,7	0,5	13,2	1,3	0,37	7,3	67,03
6	ТГ 0,6А/0,4 P12/3,7	0,6	16,5	1,2	0,37	7,6	68,64
7	ТГ 0,75А/0,4 P13/2	0,75	14,4	1,3	0,2	5,3	64,11
8	Ютрон Р-0,6	0,6	13	1,3	0,25	6,0	63,68
9	ПТГ-500-25-13/3	0,5*	9	1,3	0,3	5,0	70,05



№ пп	Марка ТГ	$N_э$ , МВт т	$G_0$ , т/ч	$P_0$ , МПа а	$P_2$ , МПа а	$d_0$ , кг/(кВт*ч)	$\eta_{oi}$ , %
10	ПРОМ-500/ 1500-Э- 14/3	0,5*	9,1	1,4	0,3	5,1	66,03

\* - внутренняя мощность на валу

Внутренний относительный КПД рассчитывался по зависимости:

$$\eta_{oi} = \frac{3600 \cdot N_э \cdot 10^6}{G_0 \cdot \Delta H_0 \cdot \eta_m \cdot \eta_{э2}}, \quad [\%] \quad (4.3)$$

где  $N_э$  - электрическая мощность турбины, МВт;

$G_0$  - расход пара на турбину, т/ч;

$\Delta H_0$  - располагаемый теплотерепад приходящийся на турбину, кДж/кг;

$\eta_m$  - механический КПД турбины, 96 % [58];

$\eta_{э2}$  - КПД электрогенератора, 92,5 % [59].

Полученный внутренний относительный КПД не зависит от мощности турбины (рис 4.11а). Основное влияние на КПД оказывает степень расширения в турбине (рис 4.11б). Величина КПД варьируется от 55 до 70 %.

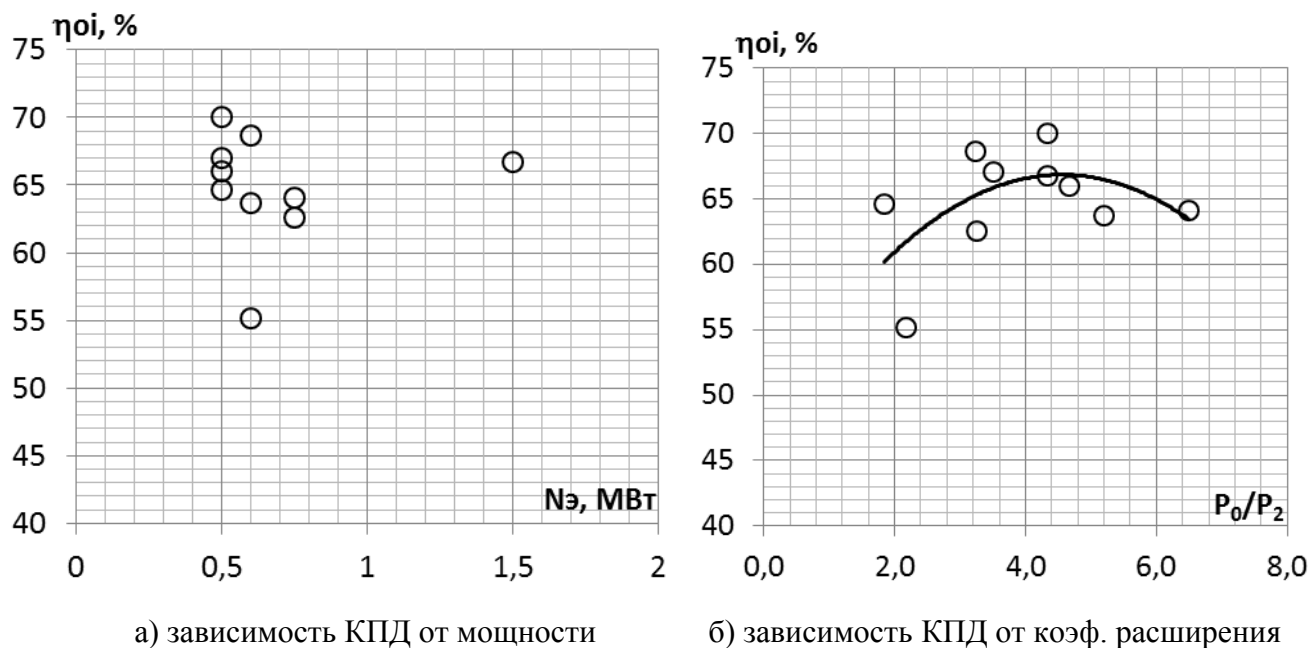


Рис. 4.11. Зависимость внутреннего относительного КПД

Зависимость удельного расхода пара на выработку электроэнергии приведена на рисунке 4.12. Для определения основных технико-экономических показателей тепловой схемы выполнен расчет на основе уравнений теплового баланса.

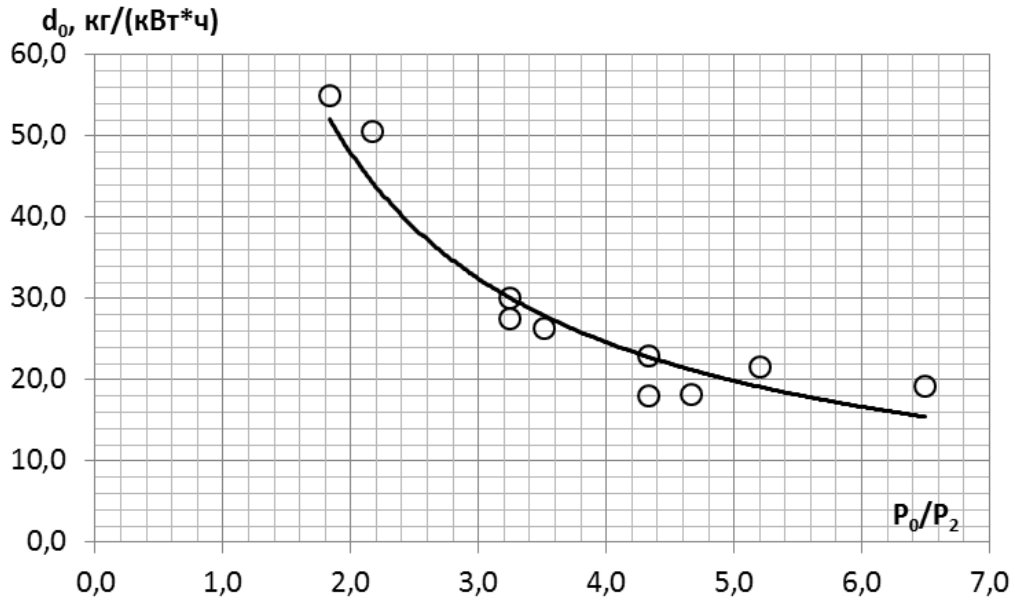


Рис. 4.12. Зависимость удельного расхода пара на выработку электроэнергии

Среднечасовые тепловые нагрузки на отопление угольного комплекса и на разогрев угля в размораживающих устройствах в течение года приведены на рис. 4.13.

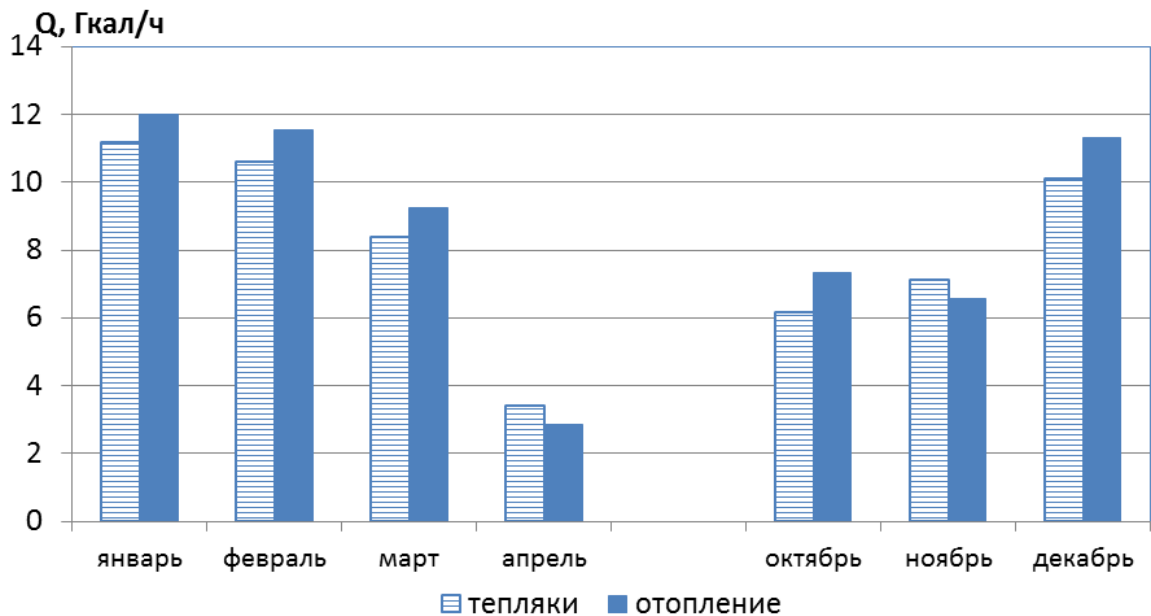


Рис. 4.13. Среднечасовые тепловые нагрузки на отопление угольного комплекса и на разогрев угля в размораживающих устройствах

При расчете внутренний относительный КПД турбины принимался равным  $\eta_{oi} = 70\%$ . Механический КПД турбины принимался равным  $\eta_m = 96\%$ . КПД электрогенератора принимался равным  $\eta_{эг} = 92,5\%$ . Для оценки КПД котлов были проведены тепловые испытания, согласно методики изложенной [86]. Зависимость КПД котла  $\eta_{ка}$  от паропроизводительности котла  $D_p$  приведена на рис. 4.14. По полученным данным построена аппроксимирующая зависимость, которая использовалась для определения КПД котла от его паропроизводительности.

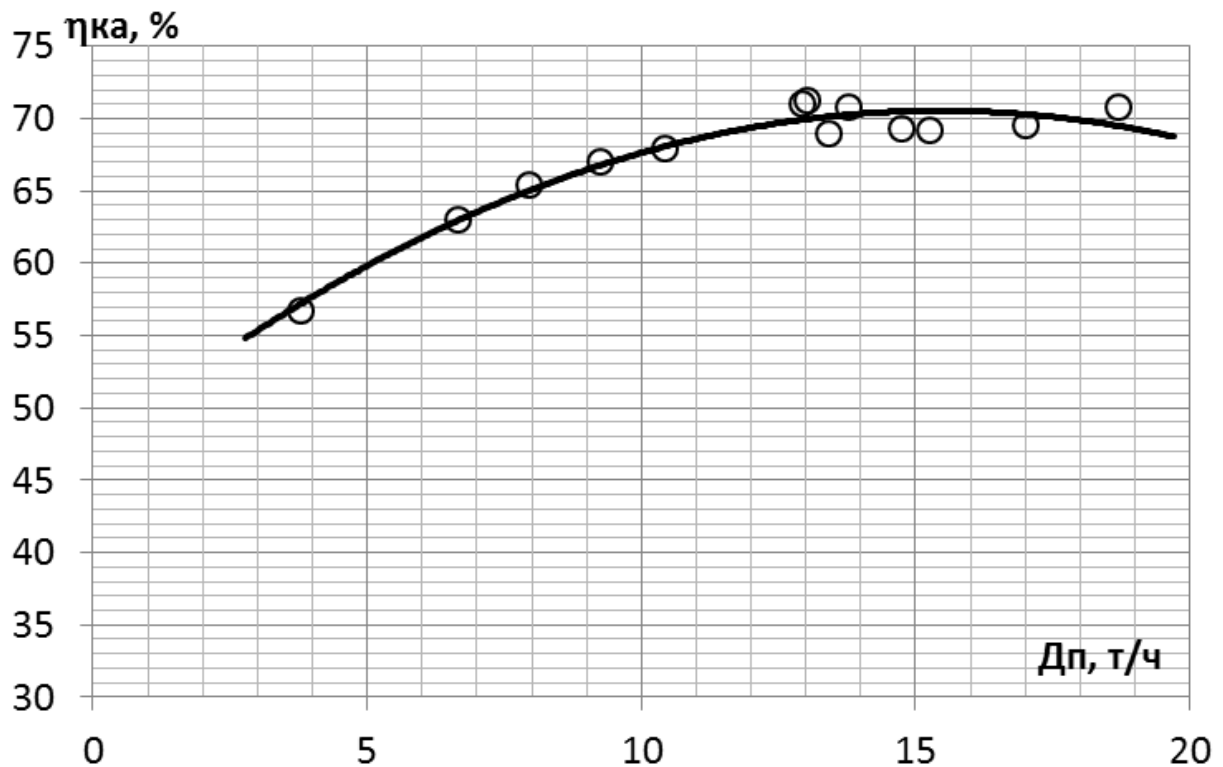


Рис. 4.14. Зависимость КПД котла от паропроизводительности

При установке турбины противодавления пар на выходе из турбины будет влажный, энтальпия пара на выходе из турбины уменьшится относительно энтальпии пара после редуционного устройства. При установке турбин противодавления для обеспечения заданной тепловой нагрузки потребуется больший расход пара.

Это приведет к увеличению паропроизводительности котлов и увеличению расхода условного топлива (рис 4.15). При этом, чем ниже будет давление пара  $P_2$  на выходе из турбины, тем больше вырастут затраты на топливо для рассматрива-

емой тепловой схемы. С другой стороны, с понижением давления пара на выходе из турбины, увеличится мощность, получаемая на турбине (рис 4.15).

Это приведет к снижению затрат на электроэнергию в рассматриваемой тепловой схеме, за счет компенсации части электроэнергии затрачиваемой на размораживающие устройства инфракрасного типа. Эксплуатационный диапазон давлений пара, при котором работают размораживающие устройства, составляет  $P_{п} = 0,2 \div 0,6$  МПа. Соответственно, давление пара  $P_2$  на выходе из турбины может изменяться в этом диапазоне. При снижении давления пара на выходе из турбины от 0,6 МПа до 0,2 МПа расход условного топлива увеличится на 9 % с 5,48 т/ч до 5,98 т/ч. При этом мощность вырабатываемая турбиной увеличится в 2,4 раза с 1087 кВт до 2620 кВт (данные цифры характеризуют работу схемы на среднечасовую тепловую нагрузку января).

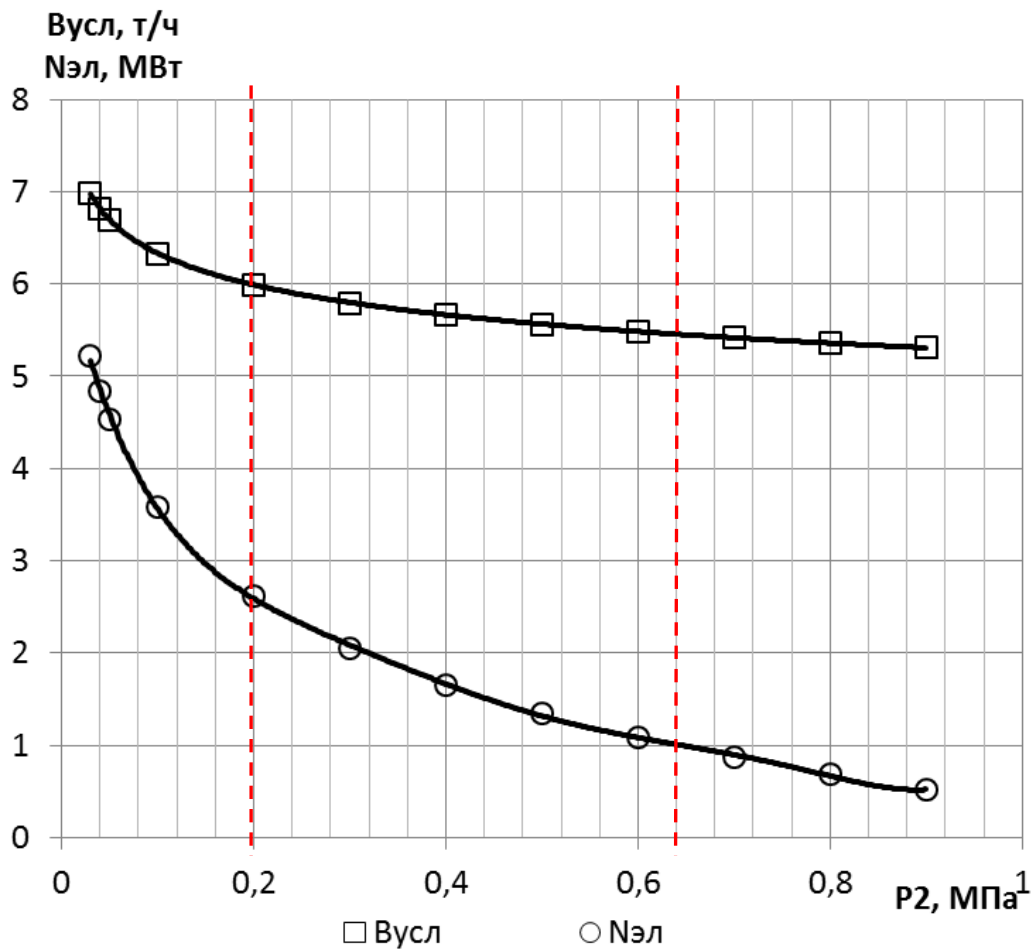


Рис. 4.15. Зависимость мощности и расхода условного топлива от давления пара на выходе из турбины

В результате общие затраты в схеме можно оценить по следующей зависимости:

$$\Sigma Z^ч = Z_T^ч - \mathcal{E}_{ЭЛ}^ч = B_{усл}^ч \cdot C_{усл} - N_{ЭЛ} \cdot Ц_{ЭЛ} \quad [\text{руб/ч}] \quad (4.4)$$

где  $Z_T^ч = B_{усл}^ч \cdot C_{усл}$  - часовые затраты на топливо, руб/ч;

$B_{усл}^ч$  - часовой расход условного топлива, т/ч;

$C_{усл}$  - стоимость условного топлива, 4100 руб/т;

$\mathcal{E}_{ЭЛ}^ч = N_{ЭЛ} \cdot Ц_{ЭЛ}$  - экономия затрат на электроэнергию, руб/ч;

$N_{ЭЛ}$  - электрическая мощность вырабатываемая турбиной противодавления, кВт;

$Ц_{ЭЛ}$  - стоимость электроэнергии, 4,6 руб/(кВт·ч).

На рисунке 4.16 приведены часовые затраты на топливо  $Z_T$ , а так же затраты на топливо за вычетом экономии средств за счет выработки электроэнергии  $\Sigma Z = Z_T - \mathcal{E}_{ЭЛ}$ .

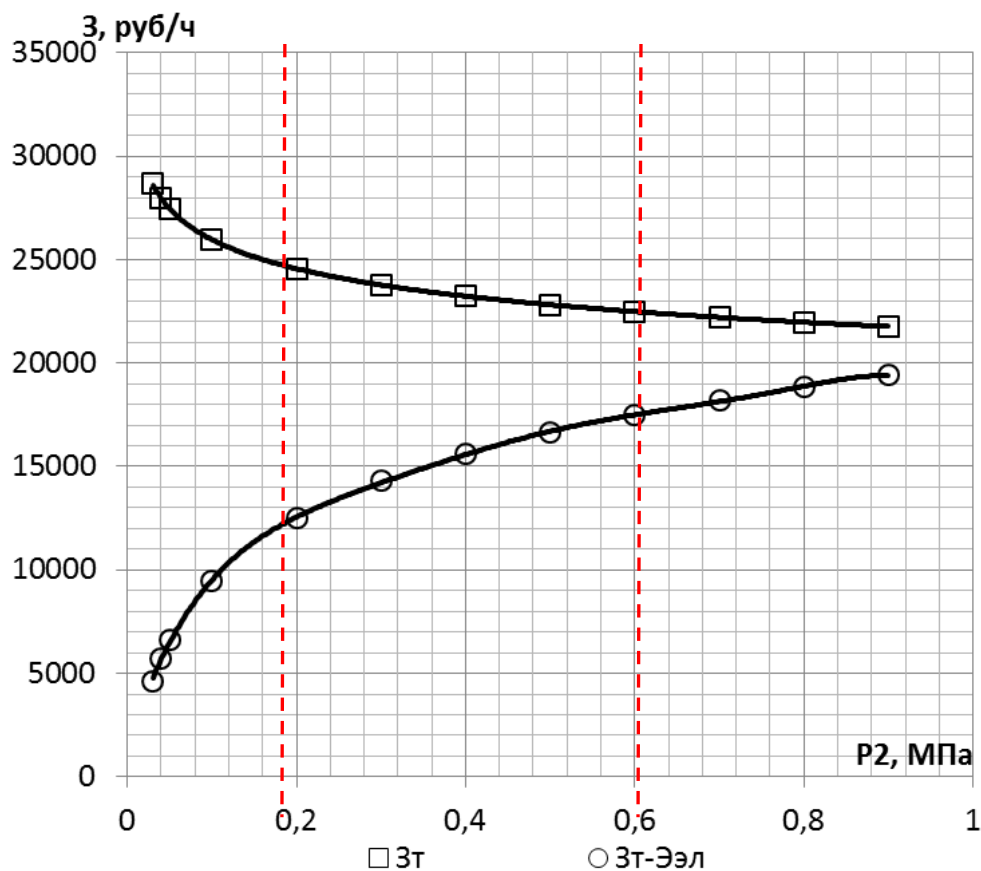


Рис. 4.16. Зависимость затрат на топливо и итоговых затрат от давления пара на выходе из турбины

Из рисунка 4.16 хорошо видно, что с понижением давления несмотря на рост затрат на топливо, итоговые затраты снижаются. Чем ниже давление на выходе из турбины - тем экономичнее работает тепловая схема.

Для годовых тепловых нагрузок был выполнен расчет тепловой схемы. Давление на выходе из турбины принято равным  $P_2 = 0,6$  МПа. На рисунке 4.17 приведены затраты на топливо для исходной схемы без турбин противодействия и затраты на топливо за вычетом экономии средств от выработки электроэнергии. При установке турбин противодействия ежемесячная экономия средств составит от 17 до 20 %. Годовая экономия средств при установке турбин противодействия составит 14,3 млн.руб.

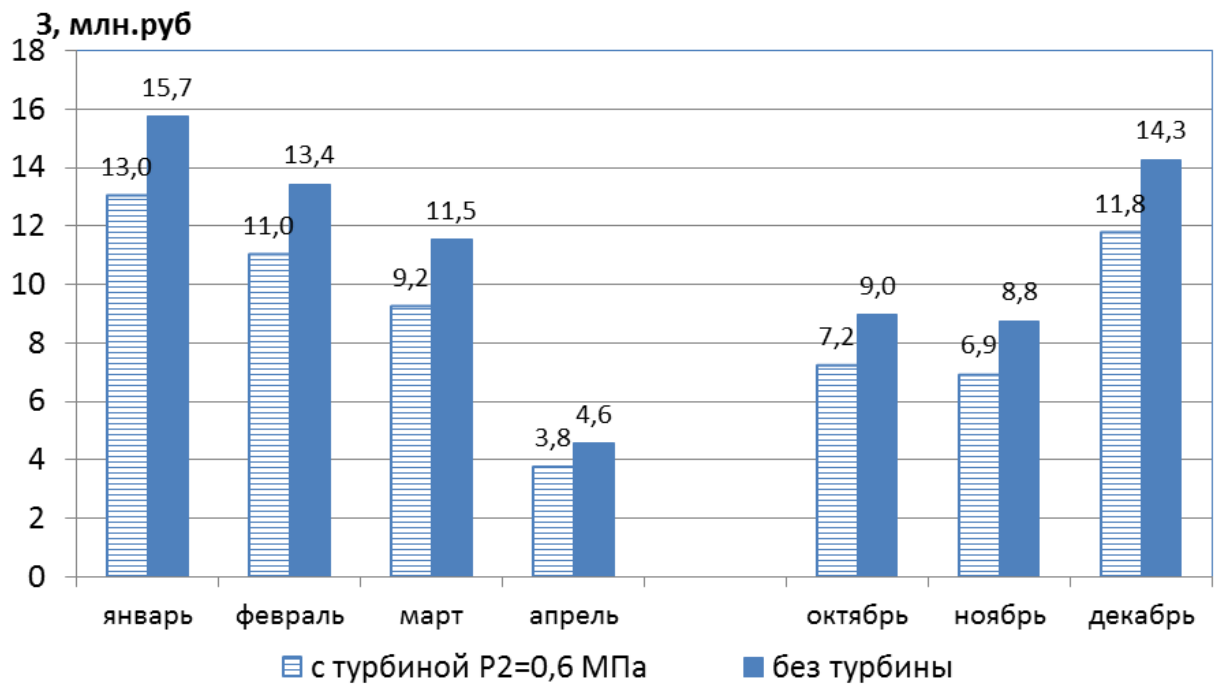


Рис. 4.17. Ежемесячные затраты на топливо для существующей схемы и при установке турбин противодействия

На рисунке 4.18 приведена годовая экономия средств, по сравнению с существующей схемой, от давления пара на выходе из турбины. Как видно из рисунка 4.18, снижение давления пара за турбиной позволяет получить дополнительную годовую экономию средств.

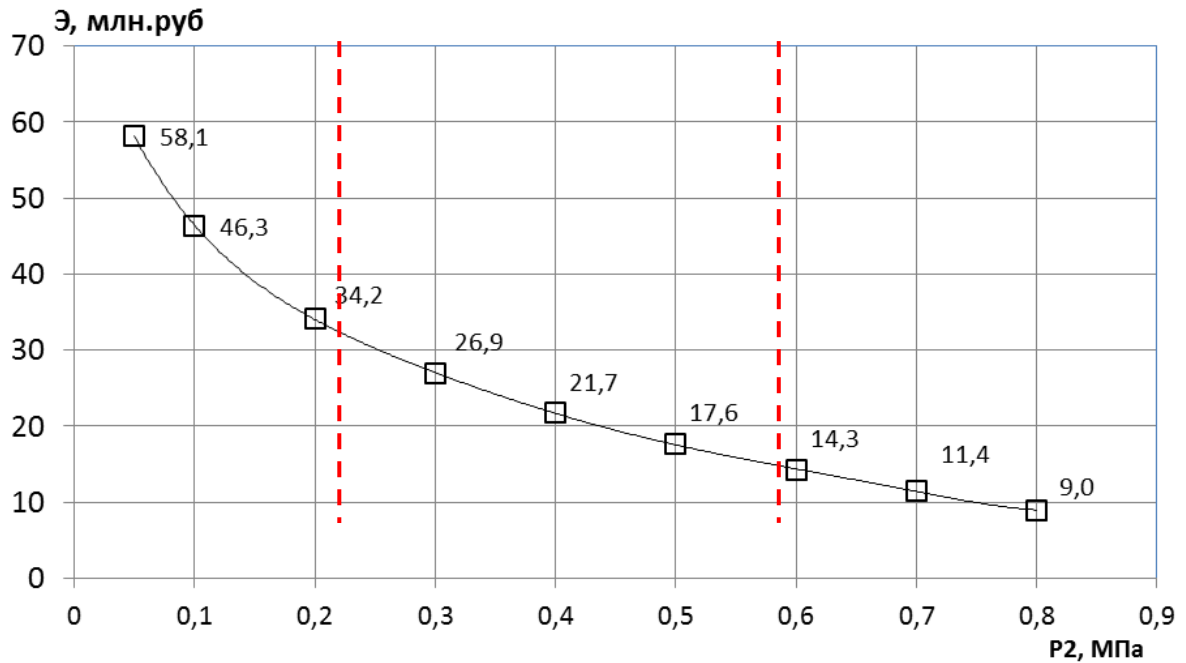


Рис. 4.18. Годовая экономия средств, при установке турбины противодавления, в зависимости от конечного давления пара за турбиной

#### 4.5 Оценка эффективности модернизации размораживающего устройства.

Для оценки эффективности реконструкции нагревательных панелей размораживающих устройств были выполнены эксплуатационные замеры расходов теплоты в течение года на размораживающих устройствах "новой" и "исходной" конструкции.

Для всех размораживающих устройств фиксировался расход пара подаваемого на обогрев, температура конденсата на выходе из размораживающего устройства, температура конденсата после охладителей конденсата, давление пара подаваемого на размораживающее устройство.

Сопоставления расхода тепла идущего на разогрев размораживающего устройства с "новой" (размораживающее устройство №1,2) и "исходной" (размораживающее устройство №3,4) конструкцией греющих экранов приведено на рисунке 4.19. На рисунке представлена зависимость среднечасового расхода тепла на размораживающее устройство №1-4 в течение двух месяцев. В качестве характерных месяцев выбраны январь и февраль, как наиболее холодные месяца, когда все четыре размораживающих устройства работали без перерыва. Количество

тепла  $Q_{в}$ , идущее на разогрев размораживающих устройств № 3 и № 4, значительно превышает расход тепла на размораживающие устройства № 1, 2. Аналогичная картина наблюдается и в других месяцах.

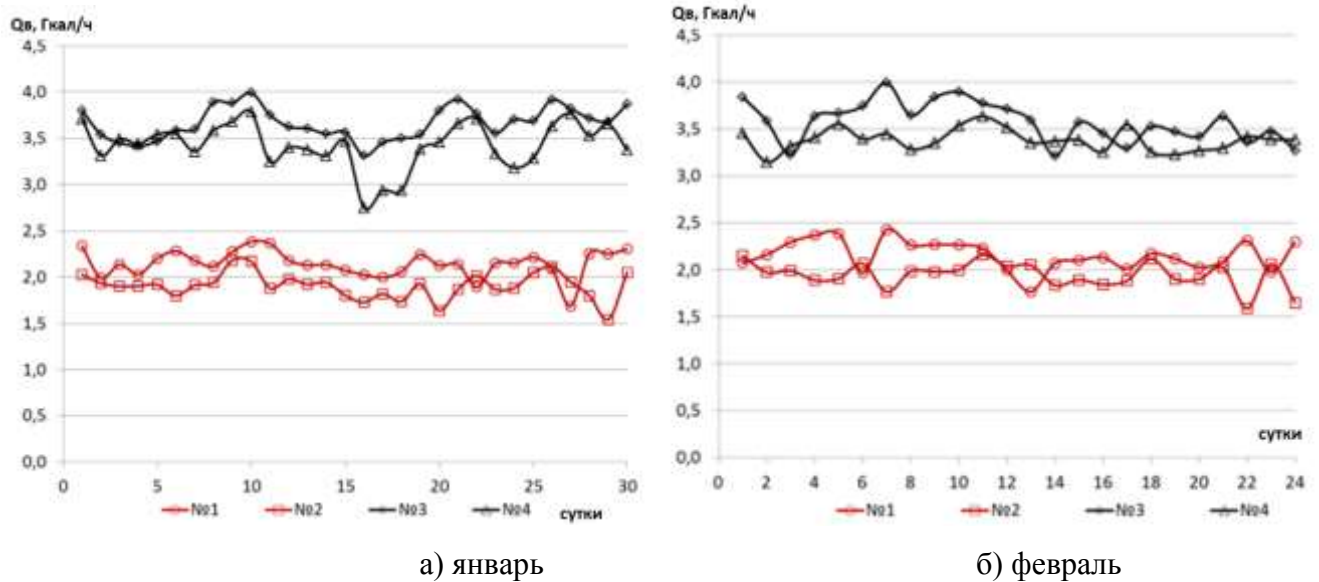


Рис. 4.19. Среднечасовой расход тепла  $Q_{в}$  на размораживающее устройство

Поскольку на момент испытаний, размораживающие устройства имели разную вместительность по количеству вагонов, то прямое сопоставление расходов тепла не корректно (размораживающие устройства № 3 и № 4 – вмещают по 20 вагонов каждое, размораживающие устройства № 1 и № 2 – по 16 вагонов). Для корректного сопоставления рассчитан удельный расход тепла  $q_{в}$ , идущего на разогрев одного вагона в размораживающем устройстве. Удельный расход тепла  $q_{в}$  представлен в таблице 4.2 и на рис. 4.20. При понижении температуры окружающей среды удельные затраты тепла на разогрев увеличиваются, достигая максимума в зимние месяцы (декабрь - февраль). Снижение затрат тепла на разогрев при повышении температуры окружающей среды вызвано двумя факторами: повышением начальной температуры груза и снижением потерь тепла через ограждающие конструкции. На рисунке 4.20 хорошо видно, что удельные затраты тепла для размораживающих устройств №1,2 ("новая" конструкция) заметно отличается от размораживающих устройств №3,4 ("исходная" конструкция).



Таблица 4.2

Месяц	Удельный расход теплоты на 1 вагон в размораживающих устройствах, $q_v$ Гкал/(ч·вагон)			
	N 1	N 2	N 3	N 4
январь	0,134	0,119	0,183	0,171
февраль	0,135	0,121	0,179	0,169
март	0,106	0,095	0,128	0,130
апрель	0,020	0,016	0,072	0,063
октябрь	0,076	0,077	0,094	0,091
ноябрь	0,094	0,086	0,125	0,122
декабрь	0,113	0,106	0,164	0,165
Средневзвешенный за год $q_v$ , Гкал/(ч·вагон)	<b>0,1111</b>	<b>0,1014</b>	<b>0,1470</b>	<b>0,1422</b>

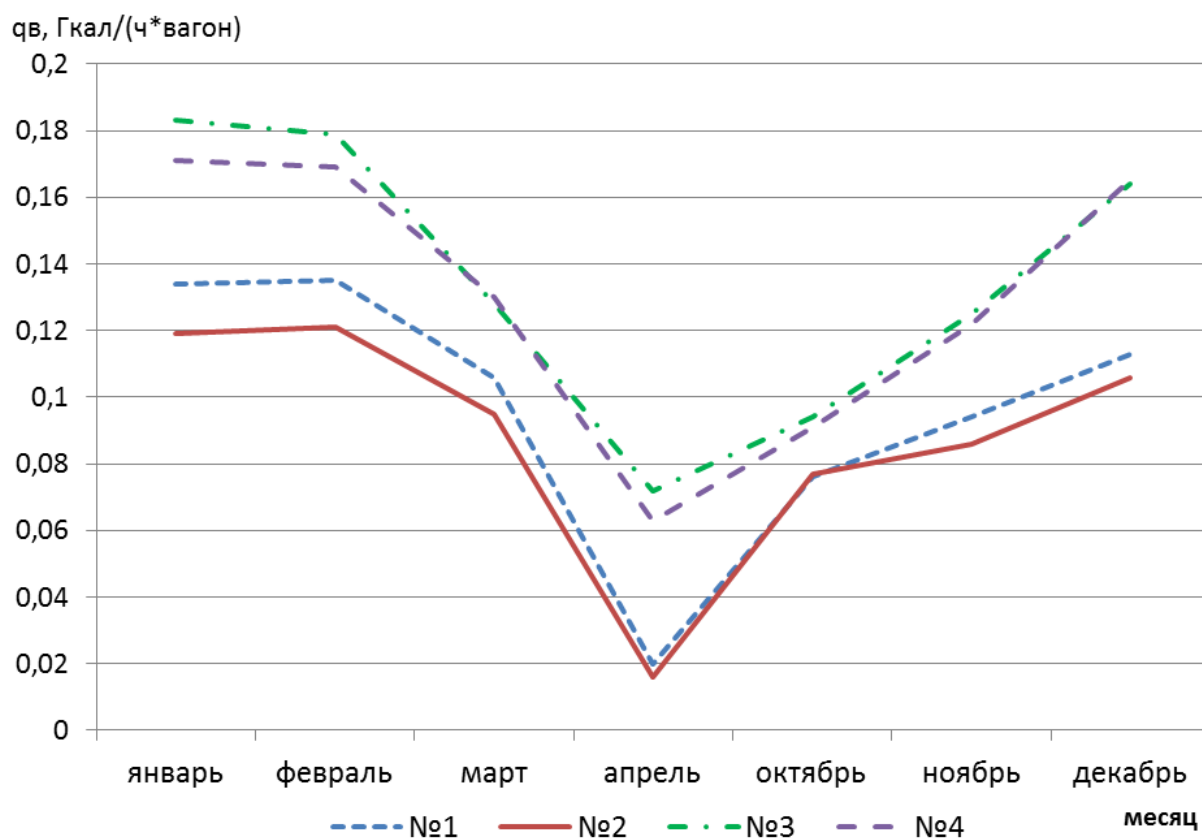


Рис. 4.20. Удельный расход теплоты на 1 вагон в размораживающих устройствах №1-4

Рассчитаны средневзвешенные, по месячным расходам теплоты, значения удельного расхода теплоты на разогрев угля в вагоне. Средний удельный расход теплоты на размораживающее устройство "новой" и "старой" конструкции определялся по зависимостям 4.5, 4.6:

$$q_{\text{с1,2}} = \frac{q_{\text{с1}} + q_{\text{с2}}}{2} = \frac{0,1111 + 0,1014}{2} = 0,1063 \quad [\text{Гкал}/(\text{ч} \cdot \text{вагон})] \quad (4.5)$$

$$q_{\text{с3,4}} = \frac{q_{\text{с3}} + q_{\text{с4}}}{2} = \frac{0,1470 + 0,1422}{2} = 0,1446 \quad [\text{Гкал}/(\text{ч} \cdot \text{вагон})] \quad (4.6)$$

где  $q_{\text{с1,2}}$  - средний удельный расход теплоты на размораживающее устройство №1,2 "новой" конструкции, Гкал/(ч·вагон);

$q_{\text{с3,4}}$  - средний удельный расход теплоты на размораживающее устройство №3,4 "исходной" конструкции, Гкал/(ч·вагон);

$q_{\text{с1... с4}}$  - средневзвешенный удельный расход теплоты на размораживающее устройство №1-4 из табл.4.2, Гкал/(ч·вагон).

Экономия тепла за счет реконструкции экранов размораживающих устройств составляет:

$$\Delta Q_1 = \frac{q_{\text{с3,4}} - q_{\text{с1,2}}}{q_{\text{с3,4}}} \cdot 100\% = \frac{0,1446 - 0,1063}{0,1446} \cdot 100\% = 26,49 \quad [\%] \quad (4.7)$$

Результаты расчетов показали, что реконструкция экранов размораживающих устройств №1,2 позволила сократить годовой расход теплоты, идущий на разогрев одного вагона, на 26,49%.

Выполнен расчет экономического эффекта за счет реконструкции нагревательных регистров, а так же за счет применения режимов с переменной температурой. Расход теплоты по месяцам на размораживающие устройства №1÷4 в течение года приведен на рис. 4.21. Основной расход теплоты приходится на период с декабря по март.

Исходные данные для расчета:

$Q_{\text{год}} = 42400$  Гкал/год - годовой расход теплоты потребляемый размораживающими устройствами составляет;

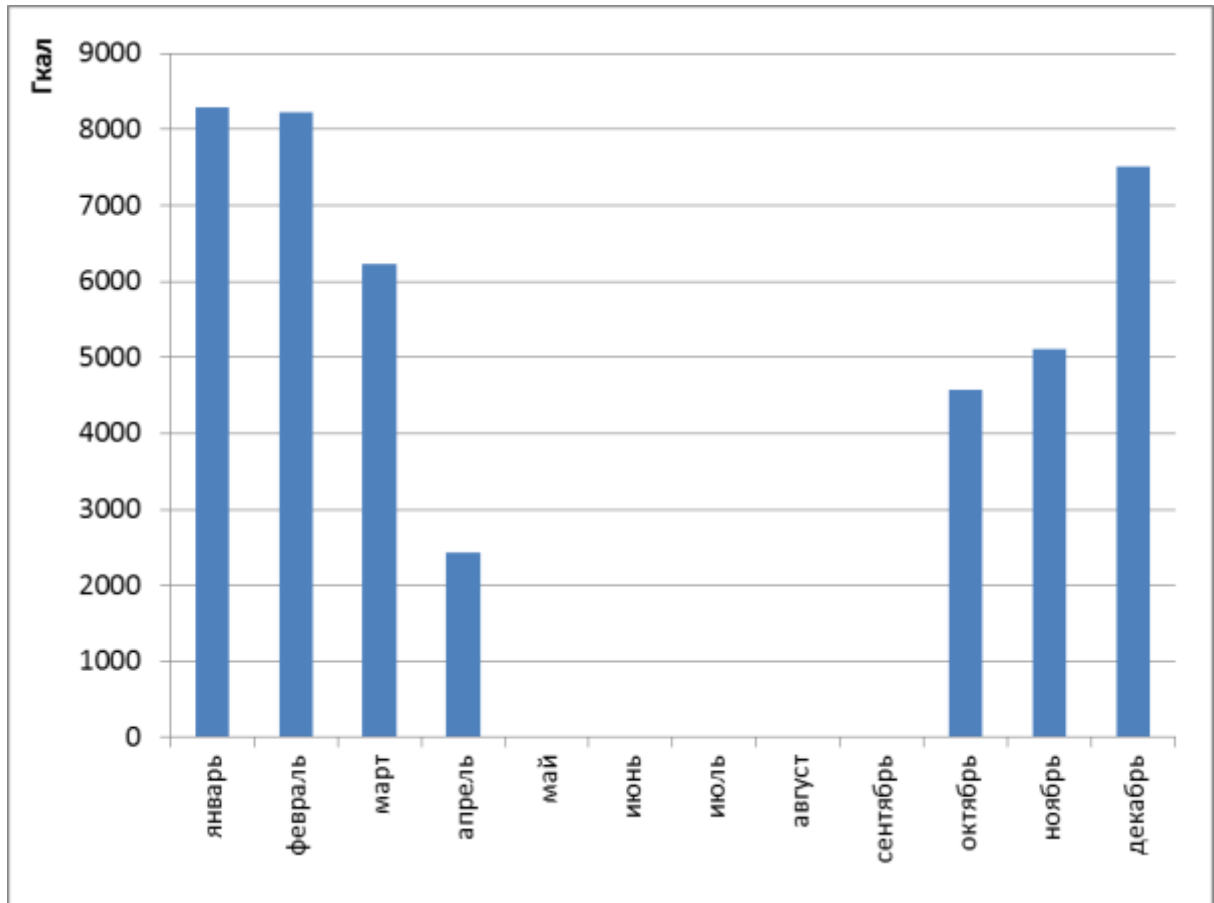


Рис. 4.21. Потребление теплоты размораживающими устройствами ОАО "Восточный порт"

$\eta_{\text{кот}} = 80 \%$  - КПД котельной по отпуску теплоты (с учетом собственных нужд и потерь тепла в паропроводах);

$Q_{\text{усл}} = 7000$  ккал/кг - теплотворная способность условного топлива;

$C_{\text{усл}} = 4100$  руб/т - стоимость условного топлива;

$\Delta Q_1 = 26,49 \%$  - экономия теплоты за счет реконструкции нагревательных панелей размораживающего устройства;

$\Delta Q_2 = 7,9 \%$  - экономия теплоты за счет оптимизации режимов работы размораживающего устройства;

Расход условного топлива необходимый для работы размораживающих устройств:

$$B_{\text{усл}} = \frac{10^5 \cdot Q_{\text{год}}}{\eta_{\text{кот}} \cdot Q_{\text{усл}}} = \frac{10^5 \cdot 42400}{80 \cdot 7000} = 7571,4 [m] \quad (4.8)$$

Годовые затраты на условное топливо для обеспечения теплотой размораживающие устройства:

$$Z_{год} = B_{усл} \cdot C_{усл} \cdot 10^{-6} = 7571,4 \cdot 4100 \cdot 10^{-6} = 31,04 [\text{млн.руб}] \quad (4.9)$$

Экономия за счет реконструкции нагревательных панелей размораживающего устройства:

$$\Delta \mathcal{E}_{рек} = Z_{год} \cdot \Delta Q_1 \cdot 10^{-2} = 31,04 \cdot 26,49 \cdot 10^{-2} = 8,22 [\text{млн.руб}] \quad (4.10)$$

Экономия за счет оптимизации режимов работы размораживающего устройства:

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E}_{оптим} &= Z_{год} \cdot (100 - \Delta Q_1) \cdot \Delta Q_2 \cdot 10^{-4} = \\ &= 31,04 \cdot (100 - 26,49) \cdot 7,9 \cdot 10^{-4} = 1,8 [\text{млн.руб}] \end{aligned} \quad (4.11)$$

### Заключение

1. Предложен новый метод снижения времени 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. 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, что подтверждено актом внедрения. Эксплуатационное снижение расхода теплоты на разогрев угля составило около 26,5 %. Расчетный годовой экономический эффект за счет внедрения новой конструкции нагревательных элементов составил от 8,22 млн. руб.

### Список условных обозначений

$W^6$  – безопасная влажность угля, при которой не происходит смерзания частиц, %;

$Q_v$  – количество тепла на один размораживающее устройство, Гкал/ч;

$q_v$  – удельный расход тепла на один размораживающее устройство, Гкал/(ч·вагон);

$P_{п}$  – давление пара подаваемого на греющие панели размораживающее устройство, МПа;

$P_6$  – давление пара в барабане котла, МПа;

$P_0$  – давление пара на входе в турбину, МПа;

$P_2$  – давление пара на входе из турбины противодавления, МПа;

$G_0$  – расход пара на турбину, т/ч;

$D_{п}$  - паропроизводительность котельного агрегата, т/ч;

$\Delta H_0$  – располагаемый теплоперепад приходящийся на турбину, кДж/кг;

$d_0$  – удельный расход пара на выработку электроэнергии, кг/(кВт·ч);

$\eta_{oi}$  – внутренний относительный КПД, %;

$\eta_{м}$  – механический КПД турбины, %;

$\eta_{эг}$  – КПД электрогенератора, %;

$\eta_{ка}$  – КПД котельного агрегата, %;

$h$  -высота от уровня пола в размораживающем устройстве, м;

$\tau$  - время пребывания вагонов в размораживающем устройстве, мин;

$t_r$  - температура нагревательных элементов - паровых регистров, задаваемая как исходные данные при моделировании,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{нас}$  - температура насыщения греющего пара в нагревательных элементах при заданной температуре  $t_r$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_v$  - температура воздуха внутри размораживающее устройство,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{подш}$  - температура поверхности подшипника размораживающее устройство,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{уг}}$  - температура угля в вагоне при разогреве в размораживающее устройство,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{пов}}$  - температура поверхности внутри размораживающее устройство,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_0$  - начальная температура угля при постановке в размораживающее устройство,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$a$  - коэффициента температуропроводности,  $(\text{м}^2/\text{с}) \cdot 10^{-7}$

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Coal Car Thaw Shed Heating Systems. Spectrum Infrared, A division of ADS, Inc. - 2008. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. - URL: [http://spectruminfrared.com/wp-content/uploads/2016/07/Car\\_Thaw\\_Shed\\_Presentation.pdf](http://spectruminfrared.com/wp-content/uploads/2016/07/Car_Thaw_Shed_Presentation.pdf) (дата обращения 17.02.2017).
2. Diomidov M.V., Nizovtsev M.I., Terekhov V.I. Ventilation of Window Interpane Cavity Aimed at a Higher Temperature of the Inner Pane // Therm. Sci. 2002. V. 6. Is. 1. P. 15.
3. 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.
4. Heindel T.J., Ramathyani S., Incropera F.P. Conjugate Natural Convection from an Array of Discrete Heat Sources: Part 1 – Two – and Three Dimensional Validation // Int. J. Heat Fluid Flow.1995.V. 16. P. 501.
5. Liu D., Zhao F.6Y., Tang G.6F. Numerical Analysis of Two Contaminants Removal from a Three – Dimensional Cavity // Int. J. Heat Mass Transfer. 2008. V. 51.P. 378.
6. Moshage R. et al. Central Heating Plant Coal Use Handbook. – 1996.
7. Prihodko A. A., Alekseenko S. V. Numerical simulation of non-stationary processes of freezing and defrosting of porous mediums //Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies. – 2012. – Т. 2012. – №. 2. – С. 57-63.
8. Shmeltser E. O. et al. Prevention of coal freezing by means of acetates //Coke and Chemistry. – 2016. – Т. 59. – №. 4. – С. 132-136.
9. Tou S.K.W., Tso C.P., Zhang X. 3D Numerical Analysis of Natural Convective Liquid Cooling of a 3x3 Heater Array in Rectangular Enclosure // Int. J. Heat Mass Transfer. 1999. V. 42. P. 3231.



- 10.Абрамович Г. Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов //Государственное энергетическое издательство. – 1948.
- 11.Андреев В. К. и др. Современные математические модели конвекции //М.: Физматлит. – 2008. – Т. 368.
- 12.Артемов В.И., Яньков Г.Г., Карпов В.Е., Макаров М.В., Численное моделирование процессов тепло-и массообмена // Теплоэнергетика. – 2000. - №7. - С.52-59.
- 13.Батраков И.И. Перевозка смерзающихся грузов/ И.И. Батраков, Ю.А. Носков, В.Н. Харламов, В.А. Шкурин; Под ред. Ю.А. Носкова. - М.: Транспорт, 1988
- 14.Беляев Н. Н., Карпо А. А. Численный расчет процесса размораживания груза в полувагоне //Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Безопасность жизнедеятельности. – 2015. – №. 83. – С. 29-33.
- 15.Богомолов А. И., Вигдорчик Д. Я., Маевский М. А. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение. – 1967.
- 16.Боровков В.М., Бородина О.А., Малая когенерация и ее особенности //Академия энергетика. –2010. - №. 5. - С.62-71.
- 17.Бороздин В.С. Влияние влажности и крупности песчано-гравийной смеси на ее смерзание. - Тр./БНИИНеруд, Госстрой СССР, 1967, вып. 22 , Тольятти, с. 17 - 19 .
- 18.Бурносенко А. Ю. Энергосберегающие технологии ООО «Ютрон-паровые турбины» //Энергосбережение. – 2008. – №. 7.
- 19.В портах Дальнего Востока складывается сложная обстановка с перевалкой грузов. Служба информации ПТР. [Электронный ресурс] URL: <http://ptr-vlad.ru/2013/03/10/v-portah-dalnego-vostoka-skladyvaetsya-slozhnaya-obstanovka-s-perevalkoj-gruzov.html> (дата обращения 25.12.2017).
- 20.В 2011 г. на Дальневосточной железной дороге усиленный контроль за сохранностью вагонного парка позволил исключить выход поврежденных вагонов на пути общего пользования. Сайт ОАО "РЖД". [Электронный ре-

сурс]. URL: [http://dvzd.rzd.ru/news/public/dvzd?STRUCTURE\\_ID=60&layer\\_id=4069&id=112351](http://dvzd.rzd.ru/news/public/dvzd?STRUCTURE_ID=60&layer_id=4069&id=112351) (дата обращения 17.02.2017).

21. Вайнер Б.М. Исследование тепло- и массообмена в процессе промораживания сыпучих грузов металлургического производства с целью предотвращения их смерзания. - Дис. канд. техн. наук - Магнитогорск: 1974 - 141 с.
22. Валитов В. А., Климов С. П., Сатин В. Б. Пособие для изучения правил технической эксплуатации электрических станций и сетей. Электрическое оборудование. – М. : " Изд-во НЦ ЭНАС", 2000.
23. Видовский Ю. Средства, предотвращающие смерзание насыпных грузов в железнодорожных вагонах, и способы, облегчающие выгрузку смерзшихся грузов "Cement, Wapno, Gips" , 1978, 32, №1 Р. 1-8. Перевод с польского языка Ивлев Б.В. - М: 1979 - 26 с.
24. Владимиров А.Н, , Брайнина Е.Ю. Выгрузка и подогрев нерудных строительных материалов в зимних условиях. - М.: Госстройиздат, 1967, 75 с.
25. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Наука, 1972. – 392 с.
26. Гончаренко Ю. Б., Анализ работы вагоноразмораживающих устройств ОАО "Восточный Порт", сборник тезисов 5-го международного форума молодых ученых стран азиатско-тихоокеанского региона. Владивосток, 2003 г.
27. Гончаренко Ю. Б., Дорогов Е. Ю. Анализ возможности использования существующих теплоисточников при перспективах развития ОАО «Восточный порт» 2002-2005 //Вологдинские чтения. – 2002. – №. 22. – С. 38.
28. Гончаренко Ю. Б., Дорогов Е. Ю. Исследование температурного режима работы тепляков конвективного типа //научное обозрение. – 2014. – №. 7-1. – С. 237-240.
29. Гончаренко Ю. Б., Дорогов Е. Ю. Определение температурного режима тепляков конвективного и радиационного типа //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №. S4-21. – С. 81-88.

30. Гончаренко Ю. Б., Дорогов Е. Ю. Повышение эффективности размораживания твердого топлива в тепляках ОАО "Восточный порт", Теплоэнергетика и энергосбережение// под ред. А.Н. Штыма; ДВФУ. -Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2011.
31. 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 г.
32. Гончаренко Ю. Б., Дорогов Е. Ю. Эффективность работы вагоноразмораживающих устройств ОАО "Восточный порт" //Вологдинские чтения. – 2004. – №. 39.
33. Гончаренко Ю. Б., Дорогов Е. Ю., Постановка задачи при проведении исследования теплообмена в вагоно-размораживающих устройствах угольного комплекса ОАО "Восточный Порт", сборник тезисов региональной научно-технической конференции «Молодежь и научно-технический прогресс», г.Владивосток, 2002г.- С.95.
34. Гончаренко Ю. Б., Кабалык Р.В. Различные способы разморозки твёрдого топлива, сборник "Вологдинские чтения", №38-1, 2004 г., с. 203-205.
35. Григорьев В. А., Зорин В. М. Теоретические основы теплотехники //Теплотехнический эксперимент. – 1988. – Т. 2.
36. Гунькова О. В., Фомин М. А. Анализ экспорта угля из Российской Федерации //Международный студенческий научный вестник. – 2015. – №. 3-2. – С. 286-287.
37. Гуцин А. А., Ермаков А. Ю., Мирошников А. М. Аналитический обзор реагентов для предотвращения смерзания угля //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – №. 3. – С. 256-268.
38. Демянкова Т. В. Учеб. пособие для студентов специальности" Орг. перевозок и упр. на трансп.(железнодорожном). – 2003.

39. Духан В. Н. Мастер коксового производства М.: Metallurgy, 1970. – 368 с.
40. Железнов С. В. Исследование и обеспечение условий перевозок грузов речным транспортом при отрицательных температурах [Электронный ресурс]: Дис. ... канд. технических науки : 05.22.19. - М.: РГБ, 2007
41. Задорожный А. В. Актуальные проблемы транспортной инфраструктуры порта «Восточный» // Наука и практика. – 2014. – С. 88.
42. Иванов Н. С., Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства мерзлых горных пород. - М, : Наука - 1965, 74 с.
43. Иванов Н.С., Степанов А.В., Филиппов П.И. Теплофизические свойства насыпных грузов. - Новосибирск: Наука - 1974, 96 с.
44. Игумнов П. В. Причины повреждения вагонного парка в портах востока России // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2013. – т. 1. – с. 32-34.
45. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М. : Наука, 1964. 489 с.
46. Ковалев А. И. и др. Применение противодавленческих турбин малой мощности в районных отопительных котельных // Обзорные прикладной и промышленной математики. – 2005. – Т. 12. – №. 4. – С. 989.
47. Кожевников Н. Н., Попов В. И., Иванов Н. С. Прогнозирование процессов промерзания в сыпучих материалах при железнодорожных перевозках. – Изд-во "Наука," Сибирское отделение, 1978.
48. Кожевников Н.Н. Изучение закономерностей промерзания в сыпучих материалах при транспортировке. - Дис. канд. техн. наук - Якутск 1977 - 235 с.
49. Криворотова В. В., Кудряшов А. Н., Коваль Т. В. Повышение энергоэффективности перевозочного процесса посредством снижения непроизводительных потерь на тягу поездов // Системы. Методы. Технологии. – 2015 - №. 3. - С.85-90.
50. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Турбулентная естественная конвекция в замкнутой полости с теплопроводными стенками конечной толщины

- //Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2009. – №. 4. – С. 66-83.
- 51.Кузнецов П. Я. Размораживающее устройство проходного типа// Промышленный транспорт. – 1986, № 2. С. 20—22.
- 52.Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче. – 1958.
- 53.Лепнев М.И. Предотвращение смерзания и восстановление сыпучести смерзшихся грузов, перевозимых в железнодорожных вагонах. Информационный вып. "Проектирование промышленного транспорта". Серия 4/30. М.: Госстрой СССР, 1968, 36 с.
- 54.Лепнев М.И. Теоретические и экспериментальные исследования процессов смерзания, разогрева и рыхления смерзшихся грузов. Тр./Промтранспроект, Госстрой СССР, 1978, вып. , с. 3 - 96.
- 55.Лепнев М.И., Кожевников Н.Н., Миграция влаги при промерзании насыпных грузов. Реферативный сб, вып. 2/59/, серия IV, Проектирование промышленного транспорта, Госстрой СССР, 1975, с. 5 - 9.
- 56.Липин А. С. Оценка сбалансированного транспортного тарифа экспорта угля //Регион: экономика и социология. – 2006. – №. 2. – С. 93-104.
- 57.Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 600 с.
- 58.Марочек В.И., Башаров Ю.Д., Попов Н.Н. Проектирование паротурбинных агрегатов. Тепловые расчеты: Учеб. пособие/ ДВГТУ. Издание переработанное и дополненное. - Владивосток, 2003.
- 59.Марочек В.И., Гончаренко Ю.Б. Турбины ТЭС [Электронный ресурс] / Инженерная школа ДВФУ. – Электрон. дан. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2015. – [309 с.]. – 1 CD. – ISBN 978-5-7444-3379-6; гос. регистрация, № 0321501799.

- 60.Мартемьянов Д. Б., Пшеничникова В. В., Шабанов Д. А. Разработка и аттестация методики испытаний для целей утверждения типа термопреобразователя сопротивления //Омский научный вестник. – 2015. – №. 2 (140).
- 61.Маталасов С.Ф. Борьба со смерзаемостью грузов при перевозках по железным дорогам. - М.: Транспорт, 1967 - с, 7 - 10.
- 62.Маталасов С.Ф., Куртукуков Л.М., Хоружий А.С. Борьба со смерзаемостью при перевозке по железным дорогам. М.: Metallurgy. 1974. – 248 с.
- 63.Маталасов С.Ф., Носков Ю.А. Перевозки смерзающихся грузов. - М.: Транспорт, 1964 - 132 с.
- 64.Медникова А.С., Тюрина Э.А., Кудряшов А.Н Математическое моделирование керамического теплообменника периодического действия //Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. - 2016 - Т1. -С.270-273.
- 65.Меркулов В. М. Некоторые нюансы измерения температуры //Энергобезопасность и энергосбережение. – 2011. – №. 5.
- 66.Мингалеева Г. Р., Зацаринная Ю. Н., Вацагина Е. К. Анализ работы системы подготовки топлива пылеугольной ТЭС //Известия высших учебных заведений. – 2005. – №. 1-2. – С. 22-31.
- 67.Михайлов Н. М., Кузнецов П. Я. , Щедрин Ф.Б., Сизин П.Р. и др. Новое размораживающее устройство // «Энергетик». - 1971. №1. - С. 25-28.
- 68.Михайлов Н. М., Толчинский Е.Н. Исследования и разработки ВТИ по совершенствованию систем и оборудования пылеприготовления и топливоподачи тепловых электростанций // «Теплоэнергетика». - 1984. №10. - С. 56-51.
- 69.Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи» издание второе //М.:«Энергия. – 1977.

70. Мунц В. А., Мунц Ю. Г., Щербинин К. А. Расчет тепловых потерь через ограждающие конструкции жилых зданий //Промышленная энергетика. – 2011. – №. 10. – С. 52-54.
71. Носков Ю.А., Пладис Ф.А. Проблемы борьбы со смерзаемостью грузов, - Железнодорожный транспорт, 1969, №10, с. 18 - 22.
72. Овчинников В. А., Гриценко И. Ю. Реконструкция котельной ОАО «Славянский СРЗ» с установкой турбин противодавления //Вологдинские чтения. – 2004.
73. Осипчик М. Г. Установка паровой турбины с противодавлением на действующей котельной. //Газотурбинные технологии. – 2008. – №. 9. – С. 30-31.
74. Павлюков А. Э., Занкович А. В., Середа А. Б. Исследование тепловых процессов в вагонах при восстановлении сыпучести смерзшихся грузов конвективным разогревом //Транспорт Урала. – 2010. – №. 4. – С. 27.
75. Павлюков А. Э., Занкович А. В., Середа А. Б. Исследование тепловых процессов в вагонах при восстановлении сыпучести смерзшихся грузов конвективным разогревом //Транспорт Урала. – 2010. – №. 4. – С. 27.
76. Парунакян В. Э. и др. Разработка методологии определения продолжительности разогрева грузов в конвективных гаражах размораживания //Вестник Приазовского государственного технического университета: Сб. науч. тр. – 2006. – С. 93-99.
77. Парунакян В. Э., Синянская Р. И. Борьба с прилипанием и примерзанием горной массы к рабочим поверхностям транспортного оборудования на карьерах //М.: Недра. – 1975.
78. Перепон В. П. Организация перевозок грузов: Учебник для техникумов и колледжей ж.-д. трансп //М.: Маршрут. – 2003. – Т. 614.
79. Пивоварова Е.Н, Химические способы борьбы со смерзаемостью угля в вагонах (по материалам фирмы Налко Кемикл Компани). В сб. Железнодорожный транспорт за рубежом.: М. ЦНИИТЭИ МПС, 1982, с. 31 - 34

80. Повороженко В.В., Лысенко Н.Е., Юхта Н.С. Организация перевозок смерзающихся грузов (опыт предприятий Урала). - М.: Транспорт, 1969 - 91 с.
81. Поливанов П. М., Поливанова Е. П. Таблицы для подсчета массы деталей и материалов. Справочник. – Машиностроение ББК: 30.3 УДК: 621, 2006.
82. Правила перевозок железнодорожным транспортом смерзающихся грузов  
Приказ Минтранса РФ от 12 декабря 2008 г. N 211 "О внесении изменений в приказ Министерства путей сообщения Российской Федерации от 5 апреля 1999 г. N 20Ц"
83. Проблемы Дальнего Востока. - 1976. - № 1. - С. 104.
84. Пчёлкин И.М. Теплоотдача вертикальных труб при естественной конвекции  
// Конвективный и лучистый теплообмен. М. — 1960. - с.
85. Разин Г.М. Исследование работы по качеству и геометризации вскрытых пород и рудного тела (разработка предложений по комплексной механизации выгрузки боксита на предприятиях отрасли в холодное время года) .  
Отчет/Промтрансниипроект, № Г.Р.81095495. М.1980. 136 с.
86. РД 153-34.1-26.303-98. Методические указания по проведению эксплуатационных испытаний котельных установок для оценки качества ремонта  
[Электронный ресурс]. URL:  
<http://meganorm.ru/Index2/1/4294817/4294817319.htm>. (дата обращения: 17.02.2017).
87. РД 34.23.505. Типовая инструкция по обслуживанию конвективных и комбинированных размораживающих устройств (размораживающее устройство) на тепловых электростанциях/ ПО Союзтехэнерго - М.: 1980. - 24 с.
88. Руднев Б. И., Повалихина О. В. Математическое моделирование локального радиационного теплообмена в камере сгорания судового дизеля // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2016. – Т. 37. - С.73-78.
89. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Расчетные значения оптико-геометрических характеристик радиационного теплообмена в камере сгорания дизельного



- двигателя //Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – №. 1-2. – С. 199-202.
- 90.Северинова Э.П., Разин Г.М., Игнатова Н.В. Определение основного параметра прочности смерзшихся насыпных грузов - сопротивление одноосному сжатию. Тр/Промтрансниипроект, Госстрой СССР,1978, вып. 9, с. 97 - 137.
- 91.Семенов, Б.А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2013. — 384 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/5107> — Загл. с экрана.
- 92.Смирнов Е. К., Носков Ю. А. Перевозки смерзающихся грузов на зарубежных железных дорогах. — М.: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1959. — 112 с.
- 93.Соколов А. Н. Методика расчета свободноконвективного теплообмена на твердых поверхностях в широком интервале температур //Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2012. – №. 2 (78).
- 94.Стёпин С. М., Мунц В. А. Проектирование поверхностей нагрева оптимального профиля котлов-утилизаторов //Энергосбережение и водоподготовка. — 2007. – №. 4. – С. 47-48.
- 95.Теплотехнический справочник: в 2-х т. / Под ред. В. Н., Юренева и П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – Т. 2. – 896 с.
- 96.Терехов В.В., Терехов В.И. Теплообмен в высокой вертикальной прослойке с оребрением одной из боковых стенок // ТВТ. 2006. Т. 44. № 3. С. 439.
- 97.Третья очередь специализированного угольного производственно-перегрузочного комплекса: сайт АО «Восточный Порт» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vostport.ru/business/third-stage/> (дата обращения: 17.02.2017).

98. Учитель А. Д., Кормер М. В., Шмельцер Е. О. Методы предотвращения смерзания углей при их транспортировке // Вестник Криворожского национального университета. – 2014. – №. 32
99. Учитель, А. Д. Проблемы транспортировки угольных концентратов в период отрицательных температур окружающей среды / А. Д. Учитель, М. В. Кормер, В. П. Лялюк // Кокс и химия. – 2013. – № 5. – С. 13-19.
100. Черников В. П. О некоторых проблемах топливно-транспортного хозяйства электростанций // Электрические станции. – 2009. – №. 07.
101. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. Справочное руководство. – 1959.
102. Шеремет М.А. Сопряженные задачи естественной конвекции. Замкнутые области с локальными источниками тепловыделения. Берлин: Lamdert Academic Publishing, 2011. 176 с.
103. Ялоха-Коха Х. Исследование способов размораживания и предупреждения смерзаемости сыпучих грузов в ПНР // Промышленный транспорт, – 1972. – № 9. – С. 14–15.

## Приложение 1. Акт внедрения АО "Восточный порт"

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

АО "Восточный порт"

Е.В. Арехта

« 13 » 12 2016г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Гончаренко Юрия Борисовича на тему: «Повышение эффективности устройств комбинированного типа для разогрева угля в вагонах».

Настоящий акт составлен в том, что внедренная на вагоноразмораживающих устройствах №№1÷4 ППК-3 АО «Восточный Порт» конструкция разогревающих паровых регистров (нагревательных панелей) взамен штатной конструкции паровых разогревающих регистров, способствовала достижению заявленных параметров, снижению расхода тепла на вагоноразмораживающие устройства, обеспечению безопасного нагрева вагонов. Конструкция разогревающих паровых регистров, установленных на вагоноразмораживающих устройствах №№1÷4 ППК-3, работая в течении длительного времени, показала высокую надежность. Конструкция разогревающих паровых регистров отличается простотой эксплуатации и не сложна в ремонте.

Главный Инженер ППК-3

A blue ink signature of V.I. Tokarev.

В.И. Токарев

Начальник ОТГ ППК-3

A blue ink signature of N.N. Belykovich.

Н.Н. Белькович