

На правах рукописи



Калинич Илья Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В КОНВЕЙЕРНЫХ
ГАЛЕРЕЯХ ГОРНООБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Красноярск 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Кулагин Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты: **Штым Константин Анатольевич**,
доктор технических наук, доцент; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», кафедра теплоэнергетики и теплотехники, заведующий кафедрой;

Караджи Вячеслав Георгиевич,
кандидат технических наук, ООО «ЭИР-ДЖИ», г. Коломна Московской области, генеральный директор.

Ведущая организация – Красноярский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт вычислительных технологий» СО РАН – Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука»

Защита диссертации состоится 09 октября 2019 года в 17:00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. 204.

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

Автореферат разослан _____._____.2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования процесса тепломассообмена в конвейерных галереях горнообогатительных комбинатов (ГОК) чёрной металлургии, где широко распространена конвейерная транспортировка влажных нагретых материалов. При этом в воздух конвейерных галерей поступает пыль, теплота и водяные пары. Повышенная влажность в сочетании с повышенной подвижностью воздуха не обеспечивают нормативные параметры для транспортных галерей. Конденсация влаги на внутренних поверхностях ограждающих конструкций и оборудования вызывает коррозию и ведёт к их преждевременному разрушению.

Степень разработанности проблемы. Основные теоретические и технические вопросы, связанные с предотвращением поступления пыли в воздух галерей, в настоящее время решены в работах И.И. Афанасьева, А.М. Гервасьева, А.В. Калмыкова, В.Г. Караджи, А.П. Колесник, И.Н. Логачёва, О.Д. Нейкова, А. Moutsoglou, В. Roux, D. Edwards и др. Изучению мероприятий по борьбе с тепло- и влагоизбытками в галереях посвящены работы А.М. Гервасьева, В.М. Маринченко, В. Б. Попова, В. Шелекетина, Р.Н. Шумилова, Т.С. Chen, С.Ф. Yun и других исследователей. Анализ выполненных работ показал, что в настоящее время недостаточно изучен тепло- и массообмен влажных нагретых материалов; отсутствуют данные по внешней аэродинамике конвейерных галерей; существующий метод расчёта воздухообмена в недостаточной степени учитывает особенности галерей влажных нагретых материалов.

В этой связи, исследования, направленные на совершенствование процесса тепломассообмена в конвейерных галереях транспортировки влажных нагретых материалов, представляются актуальными.

Работа выполнена в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники РФ Пр-577 «Энергосберегающие технологии», критические технологии «Системы жизнеобеспечения и защиты человека», «Энергосбережение», а также в ходе выполнения работ по грантам РФФИ №18-48-242001 р_мк и 18-41-242004 р_мк.

Объект исследований – конвейерные галереи ГОКов чёрной металлургии.

Предмет исследований – характеристики тепло- и воздухообменных процессов при конвейерной транспортировке влажных нагретых материалов.

Целью диссертационной работы является совершенствование процессов тепломассообмена в конвейерных галереях транспортировки влажных нагретых

материалов ГОКов чёрной металлургии для обеспечения нормируемых параметров воздушной среды конвейерных галерей.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Анализ процессов тепло- и массообмена при конвейерной транспортировке влажных нагретых материалов как с равномерными, так и с неравномерными полями температуры и влажности с целью получения расчётных формул, зависимостей и коэффициентов для определения тепло- и влаговыделений от поверхности данных материалов.

2. Экспериментальные исследования внешнего аэродинамического воздействия и нахождение значений аэродинамических коэффициентов ограждающих конструкций для определения инфильтрации воздуха в галереях.

3. Разработка аналитического метода расчёта, позволяющего определить параметры воздухообмена с учётом теплотехнических требований к ограждающим конструкциям галерей.

4. Проверка в производственных условиях достоверности и эффективности разработанного метода расчёта энергосберегающей системы воздухообмена.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлены расчётные формулы и опытные коэффициенты для расчёта тепло- и влаговыделений от поверхностей как для материалов с равномерными, так и с неравномерными полями температуры и влажности, а также зависимости изменения температуры поверхности этих материалов и коэффициентов конвективной теплоотдачи от температуры, скорости и времени транспортирования, а также значения коэффициентов для определения требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций галерей.

2. Впервые определены значения аэродинамических коэффициентов ограждающих конструкций галерей для расчёта инфильтрации воздуха.

3. Предложен аналитический метод расчёта воздухообмена для конвейерных галерей, в отличие от известных, учитывающий особенности теплотехнических требований к ограждающим конструкциям.

Значение для теории. Найдены аэродинамические коэффициенты конвейерных галерей, позволяющие определить инфильтрацию воздуха в галереях. Выявлены особенности теплотехнических требований к ограждающим конструкциям галерей, заключающиеся в использовании температуры внутренней поверхности наружных углов вместо температуры внутренней поверхности ограждений при расчёте требуемого сопротивления теплопередаче. Результаты создают теоретическую основу для проектирования и разработки новых энергоэффективных методов и оборудования в промышленных теплоэнергетических системах.

Практическая значимость результатов работы заключается в повышении эффективности (скорости, достоверности и точности) определения технологических и режимных параметров конвейерных галерей уже на стадии проектирования. Для инженерной практики теоретически обоснован, разработан и проверен в производственных условиях метод расчёта воздухообмена галерей влажных нагретых материалов ГОКов чёрной металлургии с учётом теплотехнических требований к ограждающим конструкциям, который позволяет улучшить состояние воздушной среды в конвейерных галереях.

Методология и методы исследования. Для моделирования рабочих процессов в конвейерных галереях использовалась общепринятая теория тепломассообмена. Физический эксперимент проводится на специально разработанном оборудовании [5, 6]. Математическая обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с использованием оригинального компьютерного программного обеспечения.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается использованием современных методов анализа процессов тепломассообмена и аэродинамики, а также сопоставлением результатов расчета с экспериментальными данными в ходе апробации расчетных моделей, применением сертифицированных поверенных измерительных средств, результатами экспериментальных данных полученных при проведении физического эксперимента, удовлетворительным совпадением расчётных и экспериментальных данных.

Использование полученных результатов. Основные результаты исследований и разработанный метод расчёта воздухообмена положены в основу методических рекомендаций к использованию МП «Проектный институт «Красноярскгорпроект». Запроектирована и внедрена система воздухообмена в галерее № Ш–3,4 Коршуновского ГОКа, значительно улучшившая состояние воздушной среды и условия труда, годовой экономический эффект составил 973217 рублей (в ценах II квартала 2018 года).

Полученные научные и практические результаты используются в Сибирском федеральном университете при подготовке студентов по направлениям: Теплоэнергетика и теплотехника и Техносферная безопасность в бакалаврских и магистерских программах «Энергетика теплотехнологии» и «Промышленная теплоэнергетика», а также в научно-исследовательской деятельности ПИ СФУ.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективны-2016» (Красноярск, 2016); Международной научно-технической конференции «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и

надёжность машин, приборов и оборудования» (Вологда, 2016, 2018); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы архитектуры, строительства, энергоэффективности и экологии» (Тюмень, 2016); Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство-формирование среды жизнедеятельности» (Москва, 2016, 2017); Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (Санкт-Петербург, 2017); Всероссийской научной конференции «Наука и молодёжь: проблемы, поиски, решения» (Новокузнецк, 2017).

Публикации. По результатам работы опубликовано 15 научных работ, из них: четыре статьи в рецензируемых журналах из Перечня ВАК, одна статья в ином журнале, два Патента РФ на полезную модель, 8 работ, опубликованы в материалах Всероссийских и Международных конференций.

Личный вклад автора. Автору принадлежат формализация поставленных задач, разработка аналитического метода расчёта воздухообмена для конвейерных галерей, обобщение, анализ результатов. Научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены автором лично. Разработка и реализация общей научной идеи, формулирование основных выводов и пунктов научной новизны выполнены при участии научного руководителя. В публикациях, выполненных в соавторстве, личный вклад оценивается на уровне 75 %.

Структура и объём диссертации. Материалы диссертации изложены на 193 страницах основного текста, включающего 30 рисунков и 7 таблиц. Работа состоит из введения, пяти разделов, основных выводов и рекомендаций, списка литературы из 121 наименования и 9 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность проблемы, поставлена цель и определены задачи исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первом разделе в результате обзора работ по проблеме транспортировки влажных нагретых материалов и обследования состояния воздушной среды установлено, что метеорологические условия в конвейерных галереях ГОКов не соответствуют требуемым нормативными документами: в холодный период года температура воздуха находится в пределах 3–14 °С; относительная влажность воздуха достигает 100 %; подвижность воздуха превышает нормируемую

в 5–8 раз. Причиной неудовлетворительного состояния воздушной среды является неэффективная работа систем воздухообмена, которые проектируются по приближённым методам и не учитывают особенностей галерей ГОКов.

По условиям транспортировки, охлаждения и виду тепло- и массообмена влажные нагретые материалы можно разделить на два типа: 1-й тип – влажные нагретые материалы с равномерными полями температуры и влажности. Основную часть этих материалов составляет шихта с температурой 40–80 °С и влажностью 8–12 %, 2-й тип – влажные нагретые материалы с двухслойной укладкой на ленте конвейера (нижний слой – влажная шихта с температурой 18–20 °С и влажностью 8–12 %, верхний слой – возврат агломерата с температурой до 500 °С). Для таких материалов характерна значительная неравномерность полей температуры и влажности.

Количество имеющихся на сегодняшний день данных, необходимых для расчёта тепло- и влаговыделений от поверхности влажных нагретых материалов при конвейерной транспортировке, является недостаточным для рационального проектирования галерей. В этой связи, исследования, направленные на совершенствование процессов тепломассообмена в конвейерных галереях транспортировки влажных нагретых материалов, представляются актуальными.

Во втором разделе приведено описание и результаты исследований тепло- и массообмена при конвейерной транспортировке влажных нагретых материалов 1-го типа. Экспериментальные исследования конвективного теплообмена влажных нагретых материалов 1-го типа проводились с использованием теории подобия на стенде, моделирующем конвейер с нагретым материалом, схема которой приведена на рисунке 1.

Моделирование процессов в конвейерных галереях проводилось на базе уравнений:

$$\text{а) неразрывности: } \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

$$\text{б) движения: } \text{Re} \cdot \left(w_x \cdot \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_x}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2}; \quad (2)$$

$$\text{в) энергии: } \text{Nu} \cdot \left(w_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) = \nabla^2 \cdot \theta; \quad (3)$$

$$\text{Nu} = C \cdot \text{Re}^m \cdot \text{Gr}^n, \quad (4)$$

где w_x, w_y – безразмерная скорость; x, y – координаты; θ – безразмерная температура; $\text{Re}, \text{Nu}, \text{Gr}$ – соответственно числа Рейнольдса, Нуссельта и Грасгофа; C, m, n

– соответственно коэффициент и показатели степени, полученные эмпирическим путём ($C = 0,56; 0,082$ – значения, используемые при расчёте соответственно локальных и средних коэффициентов конвективной теплоотдачи для материалов 1-го типа; $C = 3,48$ – значение для расчёта средних коэффициентов конвективной теплоотдачи для материалов 2-го типа; $m = 0,79; n = -0,15$). Число Грасгофа для материалов 1-го типа можно не учитывать, так как его влияние возможно только при высоких температурах, характерных для материалов 2-го типа.

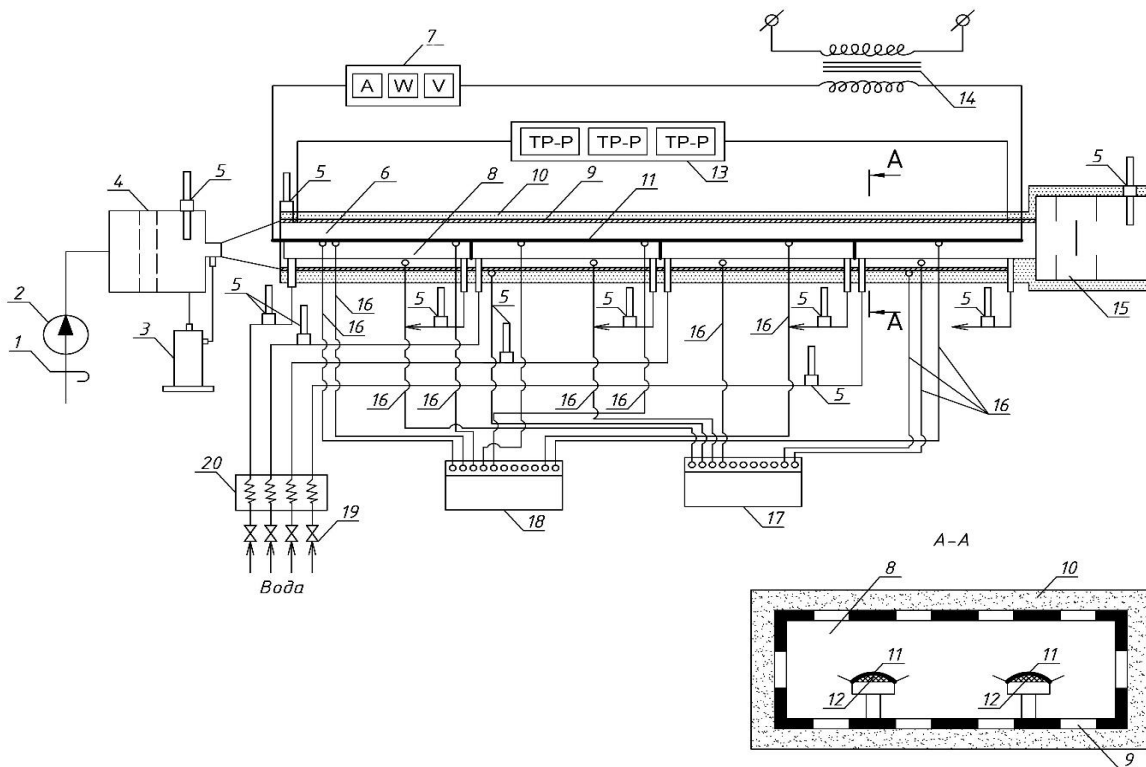


Рисунок 1 – Схема стенда для исследования конвективного теплообмена материалов при конвейерной транспортировке в галереях: 1 – регулирующая заслонка; 2 – вентилятор; 3 – микроманометр МКВ-250; 4 – камера давления с коллектором; 5 – термометры ТМ-1; 6 – галерея; 7 – электроизмерительный комплект К-505; 8 – конвейер; 9 – обогреваемые ограждающие конструкции; 10 – пенопластовая теплоизоляция; 11 – исследуемая теплоотдающая пластина; 12 – асбестовая теплоизоляция; 13 – трансформаторы АОМИ-40-220; 14 – силовой трансформатор РНО-220-40; 15 – камера смешивания; 16 – термопары ТПК-011; 17 – потенциометр ЭПП-09М; 18 – потенциометр КСП-4; 19 – регуляторы расхода воды; 20 – термостат ТС-24.

С целью определения влияния на конвективный теплообмен чисел Re и Gr , а также угла наклона галереи, по данным опытов выполнен расчёт локальных и средних коэффициентов конвективной теплоотдачи при 11-ти значениях скорости воздуха, трёх значениях температурного напора, при горизонтальном положении галереи и угле наклона 30° . Исследования проведены в диапазоне автомобильной области чисел $Re = (9-35) \cdot 10^5$ и $Gr = (2-5) \cdot 10^{10}$. Порядок проведения и

количество опытов, а также число необходимых измерений определены с привлечением методов планирования эксперимента и математической статистики.

Установлено, что влияние естественной конвекции и угла наклона галереи на конвективный теплообмен незначительно. В результате обработки экспериментальных данных получены формулы, позволяющие определить локальные и средние коэффициенты конвективной теплоотдачи при конвейерной транспортировке влажных нагретых материалов 1-го типа.

Исследования массообмена выполнялись по методике Р.Н. Шумилова. Определялись: интенсивность испарения влаги от поверхности образцов шихты ГОКов и величина экспериментального коэффициента A (таблица 1), необходимого для расчёта коэффициента массоотдачи β влажных нагретых материалов. Анализ полученных данных (рисунок 2) показывает, что коэффициент β зависит от вида материала и возрастает с увеличением влажности.

Таблица 1 – Значения экспериментального коэффициента A шихты ГОКов

| ГОК | Минералогический состав, % по массе | | | | | A |
|--------------|-------------------------------------|---------|------|-----------|------|------|
| | концентрат | возврат | руда | известняк | кокс | |
| Ковдорский | 66 | 20 | - | 8 | 6 | 54,2 |
| Коршуновский | 38 | 20 | 32 | 6 | 4 | 56,2 |
| Оленегорский | 31 | 15 | 20 | 24 | 10 | 49,5 |
| Стойленский | 46 | 26 | 16 | 6 | 6 | 63,6 |

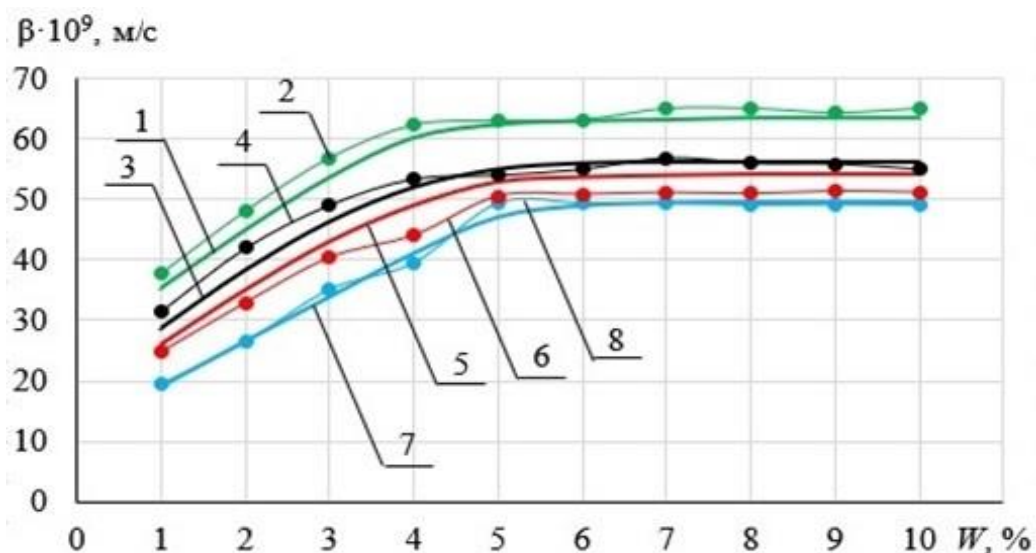


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента массоотдачи от влажности шихты ГОКов:
 1 – Стойленский; 2 – Коршуновский; 3 – Ковдорский; 4 – Оленегорский; 5 – Стойленский; 6 – Коршуновский; 7 – Ковдорский; 8 – то же, Оленегорский

Возрастание значения β происходит до некоторого критического значения влажности, которое для железорудных материалов можно принять равным 4–5 %. В производственных условиях влажные нагретые материалы имеют влажность 8–12 %, что позволяет сделать вывод о независимости коэффициента β от влажности материала в реальных условиях.

Полученные в результате исследований тепло- и массообмена данные позволяют рассчитать коэффициенты тепло- и массоотдачи и определить тепло- и влаговыделение при конвейерной транспортировке влажных нагретых материалов 1-го типа.

Третий раздел посвящен экспериментальным исследованиям тепло- и массообмена при конвейерной транспортировке влажных нагретых материалов 2-го типа, характеризующимся существенной неравновесностью. Исследования нестационарного теплообмена и расчёт тепловых потоков от поверхности материалов предполагают знание коэффициентов теплообмена в стационарных условиях. С целью определения влияния естественной конвекции были выполнены экспериментальные исследования конвективного теплообмена высокотемпературных материалов. Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 1. Число Gr изменялось в пределах $(5-46) \cdot 10^{10}$ и охватывало диапазон температур теплоотдающей поверхности от 80 °С до 500 °С.

Оценка интенсивности охлаждения возврата агломерата проводилась с использованием закономерностей нестационарной теплопроводности при следующих допущениях: материал состоит из шаров различного диаметра; охлаждение материала водяными парами незначительно; охлаждение шаров – двухстороннее. Изменение температуры поверхности возврата агломерата и шихты в зависимости от времени транспортировки представлено, соответственно, на рисунках 3 и 4.

Полученные данные позволяют определить тепло- и влаговыделения от поверхности влажных нагретых материалов 2-го типа. Промышленные исследования тепломассообмена влажных нагретых материалов подтвердили достоверность полученных расчётных зависимостей.

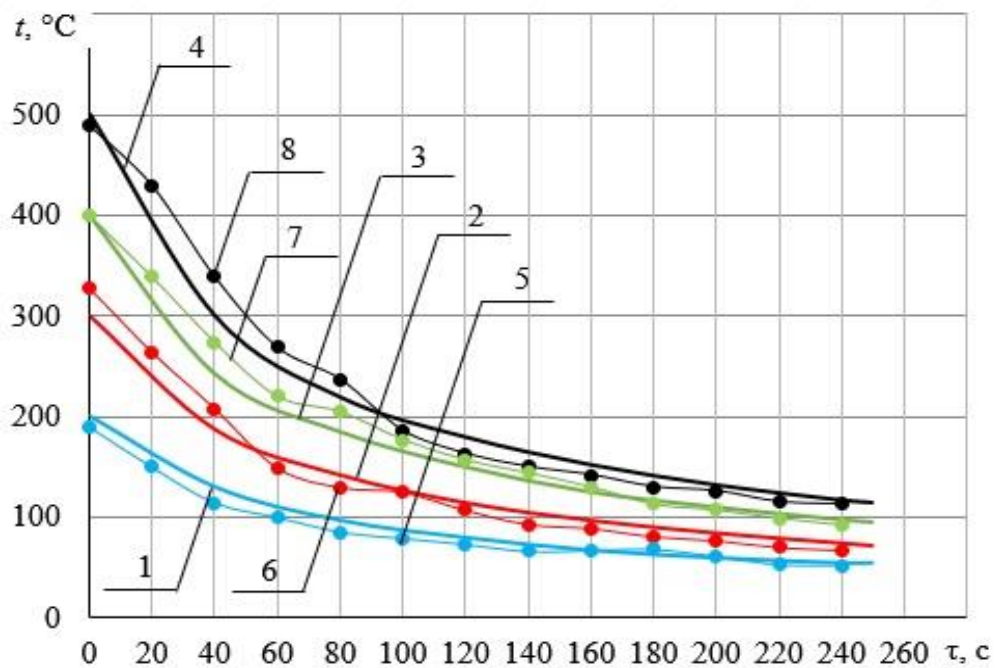


Рисунок 3 – Изменение температуры поверхности возврата агломерата в зависимости от времени конвейерной транспортировки при различной начальной температуре t_0 : 1 – $t_0 = 200$ °C; 2 – 300 °C; 3 – 300 °C; 4 – 500 °C; 5 – 190 °C; 6 – 328 °C; 7 – 400 °C; 8 – 490 °C

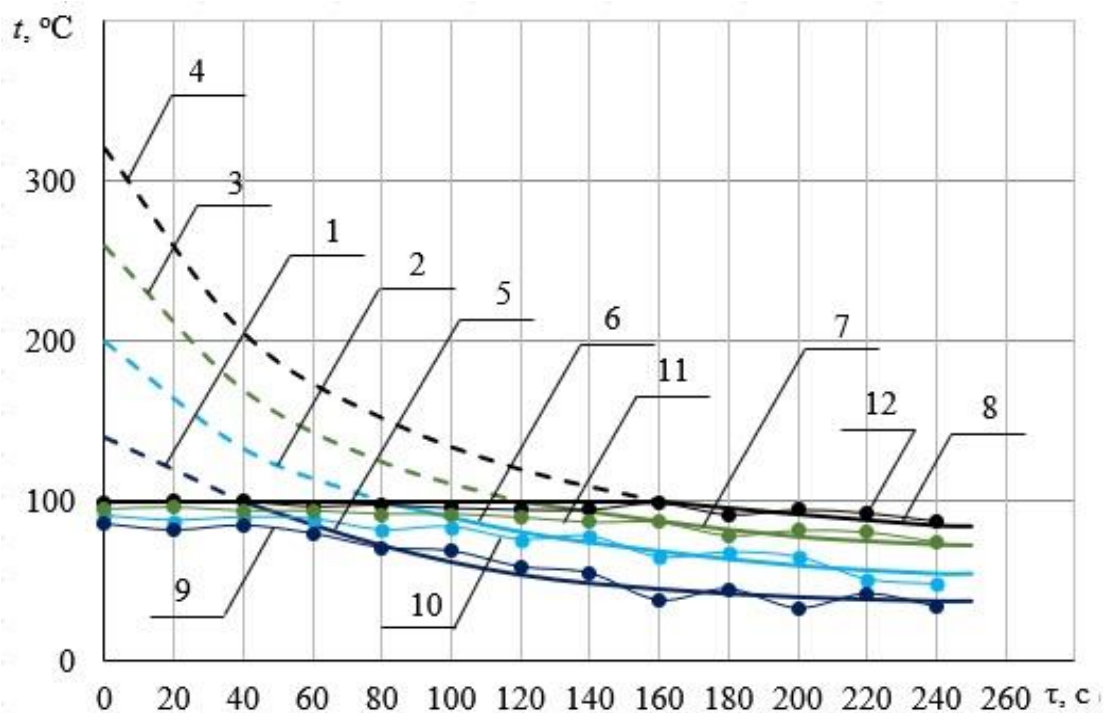


Рисунок 4 – Изменение температуры на границе слоёв материалов в зависимости от времени транспортировки при различной начальной температуре возврата агломерата t_0 : 1 – возврат агломерата при $t_0 = 200$ °C; 2 – 300 °C; 3 – 400 °C; 4 – 500 °C; 5 – шихта при $t_0 = 400$ °C; 6 – 300 °C; 7 – 400 °C; 8 – 500 °C; 9 – 190 °C; 10 – 328 °C; 11 – 400 °C; 12 – 490 °C

Четвертый раздел посвящен совершенствованию метода расчёта воздухообмена галерей влажных нагретых материалов. Полученные опытным путём значения аэродинамических коэффициентов конвейерных галерей ГОКов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Аэродинамические коэффициенты ограждающих конструкций конвейерных галерей

| Тип галереи | Аэродинамический коэффициент, k | | | |
|--------------------------|-----------------------------------|-------------|----------------------------|--------|
| | Вертикальные поверхности | | Горизонтальные поверхности | |
| | Наветренные | Заветренные | Верхние | Нижние |
| Одноконвейерная: | | | | |
| наклонная | +0,80 | -0,80 | -0,85 | -0,90 |
| горизонтальная надземная | +0,80 | -0,80 | -0,80 | -0,85 |
| горизонтальная наземная | +0,60 | -0,45 | -0,70 | - |
| Многоконвейерная: | | | | |
| наклонная | +0,80 | -0,50 | -0,70 | -0,85 |
| горизонтальная надземная | +0,80 | -0,45 | -0,65 | -0,85 |
| горизонтальная наземная | +0,60 | -0,35 | -0,55 | - |

Данные коэффициенты позволяют определить разность давлений Δp , Па, на поверхности ограждающих конструкций

$$\Delta p_i = h_i \cdot (\gamma_n - \gamma_{п}) + v_{вс}^2 \cdot \rho_n \cdot (k_n - k_з) \cdot K_1 - p_v, \quad (5)$$

где h_i – расчётная высота от верха окон, дверей, ворот или проёмов в наружных ограждениях зданий до уровня верха наружной стены, основания фонаря или устья вытяжной шахты, м; $\gamma_n, \gamma_{п}$ – удельный вес воздуха соответственно наружного и воздуха в здании, Н/м³; $v_{вс}^2$ – скорость ветра, м/с; ρ_n – плотность наружного воздуха, кг/м³; $k_n, k_з$ – аэродинамические коэффициенты соответственно для наветренной и заветренной поверхностей ограждения; K_1 – коэффициент для учёта изменения скоростного давления ветра в зависимости от высоты здания и типа местности; p_v – условно-постоянное давление воздуха в здании, Па.

Наиболее вероятным является появление конденсации влаги на внутренней поверхности ограждений у наружных углов, которая для конвейерных галерей составляет 40–60 % от общей внутренней поверхности. Исходя из этого, при определении требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций галерей, вместо температуры внутренней поверхности ограждений необходимо принимать температуру внутренней поверхности наружных углов.

В результате решения уравнений теплообмена на поверхности ограждений получено уравнение для расчёта требуемого сопротивления теплопередаче

ограждающих конструкций галерей влажных нагретых материалов R_o^{TP} , $(m^2 \cdot K)/Вт$, в общем виде:

$$(R_o^{TP})^2 - B \cdot R_o^{TP} - 2,74 = 0, \quad (7)$$

где 2,74 – константа, полученная эмпирическим путём, B – коэффициент, определяемый по формуле:

$$B = a - b \cdot \frac{t_{BH} - t_{BH}^P}{t_{BH} - t_H}, \quad (8)$$

где t_H – температура наружного воздуха, °С; t_{BH} – температура внутреннего воздуха, °С; t_{BH}^P – температура точки росы внутреннего воздуха, °С; a, b – эмпирические коэффициенты ($a = 5; b = 24; 19; 1$ – значения соответственно для стен, потолков и полов).

Величина воздухообмена в галереях влажных нагретых материалов определяется из условия ассимиляции влаговыделений. Конденсация влаги на внутренних поверхностях ограждений определяется величиной сопротивления теплопередаче ограждения, которое, в свою очередь, может удовлетворять одному из следующих условий:

- 1) общее сопротивление теплопередаче меньше требуемого
- 2) общее сопротивление теплопередаче равно требуемому;
- 3) общее сопротивление теплопередаче больше требуемого.

Первый случай ($R_o < R_o^{TP}$) возможен при расчёте воздухообмена для существующих галерей, ограждающие конструкции которых были изготовлены без учёта ныне действующих норм. В этом случае предотвращение конденсации влаги достигается повышением температуры внутренней поверхности ограждения выше температуры точки росы внутреннего воздуха, за счёт увеличения расчётной температуры внутреннего воздуха в пределах от 15 °С до 21 °С. Расчётная температура внутреннего воздуха t_{BH} , °С, определяется по полученной формуле:

$$t_{BH} = \frac{1,83 \cdot R_o - t_H}{2,17 \cdot R_o - 1}, \quad (9)$$

где 1,83; 2,17; 1 – константы, полученные эмпирическим путём; R_o – где общее сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, $(m^2 \cdot K)/Вт$.

Влагосодержание уходящего воздуха принимается равным влагосодержанию внутреннего.

Во втором случае ($R_o = R_o^{TP}$) достаточным условием недопущения конденсации влаги на внутренних поверхностях ограждающих конструкций является равенство влагосодержаний внутреннего и уходящего воздуха.

Третий случай ($R_o > R_o^{TP}$) наиболее распространённый. При разработке метода расчёта влагосодержания уходящего воздуха использован подход, предложенный Р. Н. Шумиловым. Для предотвращения конденсации влаги на внутренней поверхности ограждения её температура должна быть выше температуры точки росы уходящего воздуха на $\Delta t^p = 0,5-1,0$ °С.

Для расчёта влагосодержания уходящего воздуха d_{yx} , кг/кг с. в., получена формула:

$$d_{yx} = 0,623 \cdot \frac{110 \cdot t_{yx}^p + 90}{p_6 - 110 \cdot t_{yx}^p - 90}, \quad (10)$$

где 0,623; 110; 90 – константы, полученные эмпирическим путём; p_6 – барометрическое давление, Па.

Другие параметры воздухообмена определяются по следующим формулам:

1) температура уходящего из помещения воздуха t_{yx} , °С:

$$t_{yx} = d_{yx} \cdot k_1 - k_2; \quad (11)$$

2) температура точки росы уходящего из помещения воздуха t_{yx}^p , °С:

$$t_{yx}^p = t_{yx} \cdot k_3 + k_4; \quad (12)$$

где k_1, \dots, k_4 – расчётные коэффициенты;

3) влагосодержание приточного воздуха $d_{пр}$, кг/кг с. в.:

$$d_{пр} = 0,623 \cdot \frac{\varphi_n \cdot p_n}{p_6 - \varphi_n \cdot p_n}. \quad (13)$$

где φ_n – относительная влажность наружного воздуха, %; p_n – парциальное давление при t_n , Па.

Пятый раздел посвящен результатам внедрения, производственной проверке и эффективности полученных данных. Производственные исследования воздухообмена в галерее № Ш-3,4 Коршуновского ГОКа, разработанной на основе полученных в работе результатов, показали, что при расчётных параметрах состояние воздушной среды в галерее соответствует требуемым норматив-

ным документам. Величины тепло- и влаговыделений, определённые из тепло-воздушных балансов галереи, отличаются от расчётных не более чем на 6–9 %.

Оценка экономической эффективности результатов экспериментальных исследований произведена на примере воздухообмена галереи № Ш-3,4 Коршуновского ГОКа. В изначальном варианте, проект которого был выполнен МП «Проектный институт «Красноярскгорпроект»», ассимиляция влаговыделений осуществлялась с помощью общеобменной вентиляции по схеме воздухораспределения струями, настилающимися на покрытие, а вытяжные шахты располагались над конвейерами. Необходимый расчётный объём приточного воздуха составлял 88000 м³/ч или 400 м³/ч на 1 метр длины конвейера. Используя результаты настоящих исследований, был произведён расчёт величины и параметров воздухообмена – объём приточного воздуха составил 52000 м³/ч.

Уменьшение объёма воздуха привело к снижению капитальных и эксплуатационных затрат за счёт экономии тепла на нагревание меньшего количества воздуха, а также за счёт экономии электроэнергии на его очистку и транспортирование. Экономический эффект составил 973217 руб/год.

В приложении содержатся акты об использовании результатов работы в промышленности и научно-исследовательской деятельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены расчётные формулы и опытные коэффициенты для расчёта тепло- и влаговыделений от поверхностей как для материалов с равномерными, так и с неравномерными полями температуры и влажности, а также зависимости изменения температуры поверхности этих материалов и коэффициентов конвективной теплоотдачи от температуры, скорости и времени транспортирования, и значения коэффициентов для определения требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций галерей.

2. Впервые определены значения аэродинамических коэффициентов ограждающих конструкций, позволяющие уточнить расчеты инфильтрации воздуха в галереях.

3. Для материалов 1-го типа (шихта с температурой 60–80 °С и влажностью 8–12 %, равномерные поля температуры и влажности) экспериментально выявлены закономерности теплообмена и получены расчётные формулы для определения локальных и средних коэффициентов конвективной теплоотдачи; установлено, что при увеличении влажности материала до 4–5 % коэффициент массоотдачи возрастает, при дальнейшем увеличении влажности – изменяется незначительно; получены опытные коэффициенты, поз-

воляющие рассчитать коэффициент массоотдачи и влаговыделения от поверхности данных материалов.

4. Для материалов 2-го типа (двухслойные материалы: нижний слой – шихта с температурой 18–20 °С и влажностью 8–12 %, верхний слой – возврат агломерата с температурой 200-500 °С, неравномерные поля температуры и влажности) экспериментально определены закономерности теплообмена и получена расчётная формула для определения средних коэффициентов конвективной теплоотдачи; аналитически получены зависимости для определения температуры поверхностей возврата агломерата и шихты, позволяющие рассчитать тепло- и влаговыделения от поверхности данных материалов.

5. Предложен аналитический метод расчёта, позволяющий определить величину и параметры воздухообмена в галереях влажных нагретых материалов с учётом теплотехнических требований к ограждающим конструкциям, а также подтверждена его эффективность и достоверность полученных данных для расчёта тепло- и влаговыделений от поверхности транспортируемых материалов в результате производственных испытаний.

6. На основе результатов исследований разработаны методические рекомендации, в результате внедрения которых в галерее № Ш-3,4 Коршуновского ГОКа, значительно улучшено состояние воздушной среды, а также получен годовой экономический эффект в размере 973217 рублей (в ценах II квартала 2018 года).

Перспективы дальнейших исследований в данном направлении могут заключаться в разработке универсальных математических моделей тепломассообмена в транспортных галереях как ГОКов, так и, например, для систем топливоподачи на ТЭС, ТЭЦ и др. объектах с учетом всех внешних факторов, которые могут полностью исключить проведение дорогостоящих экспериментальных работ.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях: статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, из Перечня ВАК:

1. Калинин И.В., Кулагин В.А. Экспериментальное исследование теплообмена нагретых материалов при конвейерной транспортировке. *Вестник ИрГТУ*. 2019. Том 23. № 3.

2. Калинин И.В., Смольников Г.В. К расчёту тепло- и влаговыделений при проектировании вентиляции в конвейерных галереях для транспортировки влажных нагретых материалов. *Журнал СФУ. Техника и технология*. 2016. 9(4). 603–610.

3. Калинин И.В., Смольников Г.В., Сакаш Г.В. К расчёту воздухообмена в помещениях с повышенной влажностью. *Энергосбережение и водоподготовка*. 2016. № 5. 63–65.

4. Калинин И.В., Смольников Г.В., Сакаш Г.В. Теплоотдача от поверхности нагретых материалов при конвейерной транспортировке. *Известия ВУЗов. Строительство*. 2015. № 11–12. 74–84.

патенты РФ

5. Патент РФ № 169152. *Стенд для моделирования теплообмена транспортируемых конвейерами горячих материалов* / И.В. Калинин, Г.В. Смольников; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (RU). – № 2016142369; заявлен 27.10.2016, опубликован 07.03.2017.

6. Патент РФ № 170748. *Лабораторная установка по тепломассообмену* / И.В. Калинин, Г.В. Смольников, Г.В. Сакаш, В.А. Таранов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (RU). – № 2016127376; заявлен 06.07.2016, опубликован 05.05.2017.

статьи, опубликованные в других изданиях

7. Калинин И.В. Стенд для моделирования теплообмена транспортируемых конвейерами горячих материалов. *Евразийский научный журнал*. 2016. № 7. 228–230.

материалы научно-технических конференций

8. Калинин И.В. Энергосберегающий способ обестуманивания галерей горнообогатительных комбинатов. *Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Матер. Междунар. НТК*. Вологда, 2018. 33–35.

9. Калинин И.В. Аэродинамическое влияние ветра на конвейерные галереи влажных нагретых материалов. *Строительство-формирование среды жизнедеятельности: Сб. матер. Междунар. межвуз. НПК студентов магистрантов, аспирантов и молодых учёных*. М., 2017. 989–991.

10. Калинин И.В. Совершенствование методики расчёта влаговыделений от поверхности влажных нагретых материалов. *Актуальные проблемы современного строительства: Матер. Всерос. НПК*. Санкт-Петербург, 2017. 53–56.

11. Калинин И.В. Аэродинамическое влияние ветра на конвейерные галереи транспортировки влажных горячих материалов. *Наука и молодёжь: проблемы, поиски, решения: Матер. Всерос. науч. конф.* Новокузнецк, 2017. 77–80.

12. Калинин И.В., Смольников Г.В. К расчёту теплоотдачи от поверхности нагретых материалов. *Перспектив Свободный-2016: Сб. матер. Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных*. Красноярск, 2016. 54–57.

13. Калинич И.В., Смольников Г.В., Сакаш Г.В. Автоматизация экспериментальных исследований массообмена влажных нагретых материалов. *Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Матер. Междунар. НТК*. Вологда, 2016. 85–87.

14. Калинич И.В., Смольников Г.В., Сакаш Г.В. Экспериментальное исследование тепломассообмена парящих материалов в условиях транспортирования их конвейерами. *Актуальные проблемы архитектуры, строительства, энергоэффективности и экологии: Сб. матер. Междунар. НПК*. Тюмень, 2016. 178–182.

15. Калинич И.В. The improvement of calculation method of general ventilation in rooms with water generation. *Строительство-формирование среды жизнедеятельности: Сб. матер. Междунар. межвуз. НПК студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных*. М., 2016. 948–952.