

На правах рукописи



Калинич Илья Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В КОНВЕЙЕРНЫХ
ГАЛЕРЕЯХ ГОРНООБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ**

05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Красноярск 2020

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «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, Общество с ограниченной ответственностью «ЭИР-ДЖИ», г. Коломна Московской области, генеральный директор.

Ведущая организация – Красноярский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук – Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука»

Защита диссертации состоится 20 мая 2020 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, д. 70, ауд. А-204.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2020 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 данном процессе в воздух галерей поступают теплота и водяные пары. Повышенные влажность и подвижность внутреннего воздуха не обеспечивают нормативных параметров микроклимата конвейерных галерей. Конденсация влаги на внутренних поверхностях ограждающих конструкций и оборудования вызывает коррозию и сокращает срок их эксплуатации.

Степень разработанности проблемы. Исследованием мероприятий по борьбе с тепло- и влагоизбытками занимались: А.М. Гервасьев, В.М. Маринченко, В.Б. Попов, В.В. Шелекетин, Р.Н. Шумилов, Г.В. Смольников, В.Г. Караджи, Т.С. Chen, С.Ф. Yun, А. Moutsoglou, В. Roux, D. Edwards и другие авторы. Анализ выполненных работ показал: требуется уточнение расчётных формул для определения тепловыделений от поверхности транспортируемых в конвейерных галереях ГОКов влажных нагретых материалов; данные по коэффициентам массоотдачи, необходимые для расчёта влаговыделений от поверхности влажных нагретых материалов, определены только для пяти российских ГОКов, в связи с чем требуются исследования материалов, транспортируемых на других предприятиях России; формулы для теплотехнического и аэродинамического расчётов, входящие в известный аналитический метод расчёта величины и параметров воздухообмена не удовлетворяют требованиям современной нормативной литературы и требуют корректировки.

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 № 18-48-242-001 и 18-41-242004 р_мк (2018–2020 гг.).

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 внутренней воздушной среды конвейерных галерей.

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

1) экспериментально исследован тепло- и массообмен при конвейерной транспортировке влажных нагретых материалов с целью получения расчётных формул для определения тепловыделений и коэффициентов, необходимых для определения влаговыделений, поступающих от поверхности данных материалов;

2) усовершенствован аналитический метод расчёта, позволяющий определить величину и параметры воздухообмена с учётом требований современной нормативной документации;

3) произведена проверка в производственных условиях достоверности полученных в работе расчётных формул и опытных коэффициентов, а также эффективности усовершенствованного аналитического метода расчёта.

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.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1) определены формулы для расчета тепловыделений от поверхности влажных нагретых материалов при конвейерной транспортировке;

2) найдены значения коэффициентов для определения влаговыделений от поверхности влажных нагретых материалов;

3) предложен усовершенствованный аналитический метод расчёта величины и параметров воздухообмена для конвейерных галерей, отличающийся от известных учётом требований современной нормативной документации.

Значение для теории. Экспериментально определены коэффициенты, используемые при расчёте влаговыделений от поверхности транспортируемых

материалов. Получены формулы для расчёта локальных и средних коэффициентов теплоотдачи. Усовершенствован аналитический метод расчёта величины и параметров воздухообмена для конвейерных галерей с учетом современной нормативной документации. 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 разработана программа для ЭВМ по расчёту микроклимата «Метод расчёта величины и параметров воздухообмена для помещений с тепловлагоизбытками» [8], проверенная в производственных условиях.

Использование полученных результатов. Разработанная программа для ЭВМ «Метод расчёта величины и параметров воздухообмена для помещений с тепловлагоизбытками» принята к использованию ООО «ГеоТехПроект».

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 теплотехнологий» и «Промышленная теплоэнергетика», а также в научно-исследовательской деятельности ПИ СФУ.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов анализа процесса тепломассообмена, а также сопоставлением результатов расчёта с экспериментальными данными в ходе апробации расчётных моделей, применением сертифицированных измерительных средств, результатами экспериментальных данных, полученных при проведении физического эксперимента, хорошим совпадением расчётных и экспериментальных данных.

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 %.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектив-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 научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета «Архитектура – Строительство – Транспорт» (Санкт-Петербург, 2016); Всероссийской научной конференция «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения» (Новокузнецк, 2017); Всероссийской научно-технической конференции «Борисовские чтения» (Красноярск, 2019).

Публикации. По результатам работы опубликовано 19 научных работ, из них: четыре статьи в рецензируемых журналах из Перечня ВАК, одна статья в ином журнале, три патента на полезную модель, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; 10 работ опубликованы в материалах Всероссийских и Международных конференций.

Структура и объём диссертации. Материалы диссертации изложены на 127 страницах основного текста, включающего 16 рисунков и 6 таблиц. Работа состоит из введения, 4 разделов, основных выводов и рекомендаций, списка литературы из 80 наименований и 6 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 большинстве конвейерных галерей ГОКов не соответствуют требуемым нормативными документами, параметры микроклимата имеют следующие значения: в холодный период года температура воздуха находится в пределах 5–14 °С; относительная влажность воздуха достигает 100 %; подвижность воздуха превышает нормируемую в среднем в 6 раз. Причина неудовлетворительного состояния внутренней воздушной среды – неэффективная работа систем воздухообмена, которые проектируются по приближённым методам и не учитывают ряд особенностей галерей ГОКов

По условиям транспортировки, охлаждения и виду тепло- и массообмена влажные нагретые материалы ГОКов характеризуются относительно равномерными полями температуры и относительной влажности. Основную часть указанных материалов составляет шихта, имеющая следующие параметры: температура поверхности – 60–80 °С; относительная влажность – 8–12 %.

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

Во втором разделе приведены описание и результаты экспериментальных исследований тепло- и массообмена при конвейерной транспортировке влажных нагретых материалов.

Моделирование процесса теплообмена в конвейерных галереях проводилось на базе уравнений:

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

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

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

где w_x , w_y – безразмерная скорость; x , y – координаты; θ – безразмерная температура.

Полученное в результате моделирования уравнение позволяет рассчитать тепловыделения от поверхности транспортируемого материала:

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

где C , m – соответственно коэффициент и показатель степени, полученные эмпирическим путём ($C = 0,049$; $0,071$ – значения, используемые при расчёте соответственно локальных и средних коэффициентов теплоотдачи влажных нагретых материалов; $m = 0,8$); Re , Nu , Gr – соответственно числа Рейнольдса, Нуссельта и Грасгофа ($\text{Gr} \approx 1$).

Экспериментальные исследования конвективного теплообмена влажных нагретых материалов проводились с использованием теории подобия на стенде, моделирующем конвейер с нагретым материалом, схема которого приведена на рисунке 1.

Для 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 автомоделльной области чисел $\text{Re} = (9-35) \cdot 10^5$ и $\text{Gr} = (2-5) \cdot 10^{10}$. Порядок проведения и количество опытов, а также число необходимых измерений определены с привлечением методов планирования эксперимента и математической статистики.

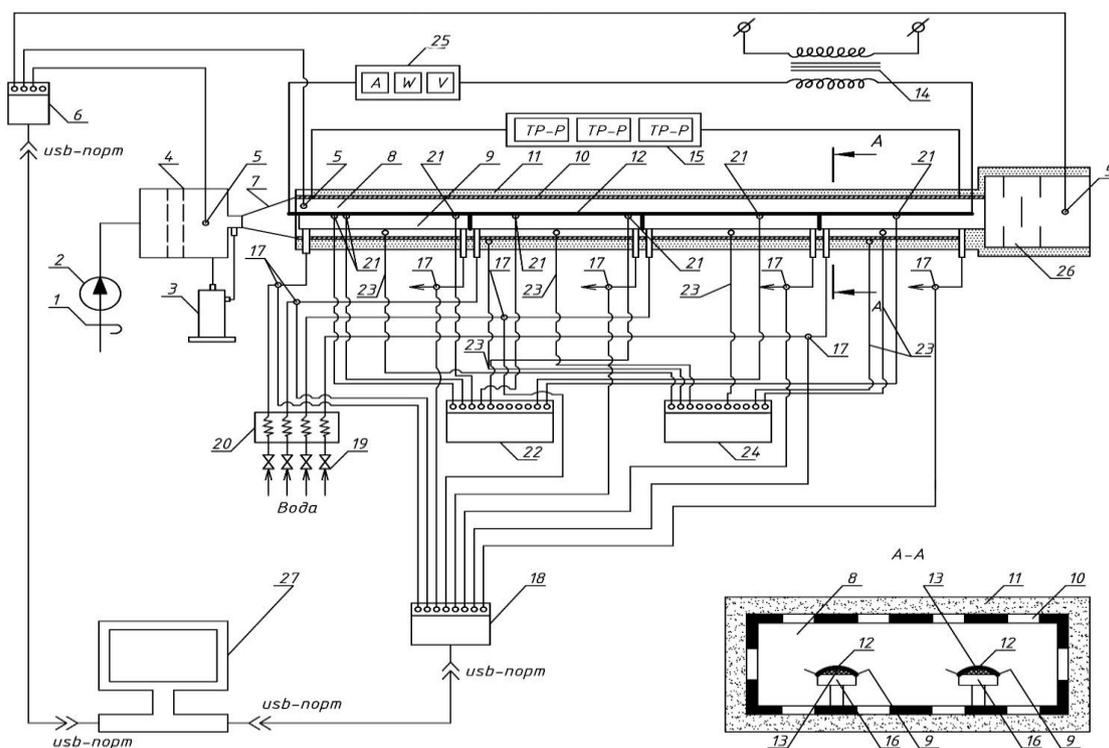


Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда для исследования теплообмена [5]:

1 – регулирующая заслонка; 2 – вентилятор; 3 – микроманометр МКВ-250; 4 – камера статического давления с коллектором; 5 – термопара ТПК 011; 6 – ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ251; 7 – патрубок; 8 – модель галереи; 9 – модель конвейера; 10 – ограждающие конструкции; 11 – пенопластовая теплоизоляция; 12 – исследуемая пластина; 13 – теплоэлектроизоляционная подложка; 14 – силовой трансформатор РНО-220-40; 15 – трансформаторы АОМИ-40-220; 16 – полость; 17 – термопара ТПК 011; 18 – ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ138; 19 – регулятор расхода воды; 20 – термостат; 21 – термопара ТПК 011; 22 – потенциометр ЭПП-09М; 23 – термопара ТПК 011; 24 – потенциометр КСП-4; 25 – электроизмерительный комплект К-505; 26 – камера смешения; 27 – компьютер.

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 , м/с, влажных нагретых материалов:

$$\beta = A + 25,7 \cdot 10^{-9} \cdot v_{\text{кн}}, \quad (5)$$

где $v_{\text{кн}}$ – скорость движения конвейерной ленты, м/с.

Общий вид лабораторной установки для исследования массообмена влажных нагретых материалов [6] приведён на рисунке 2, её принципиальная схема со всеми конструктивными элементами – на рисунке 3.

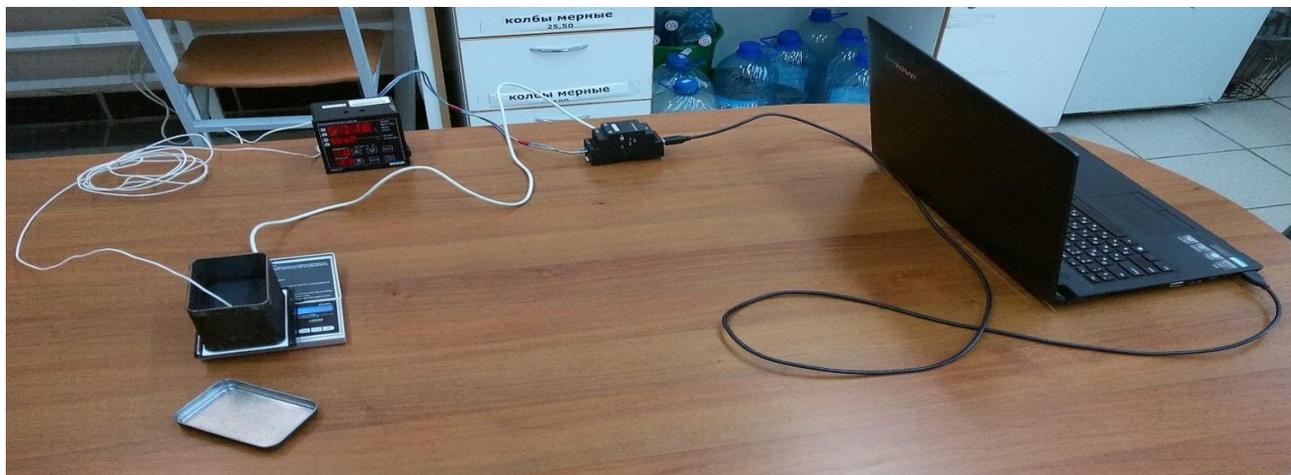


Рисунок 2 – Общий вид лабораторной установки для исследования массообмена влажных нагретых материалов [6]

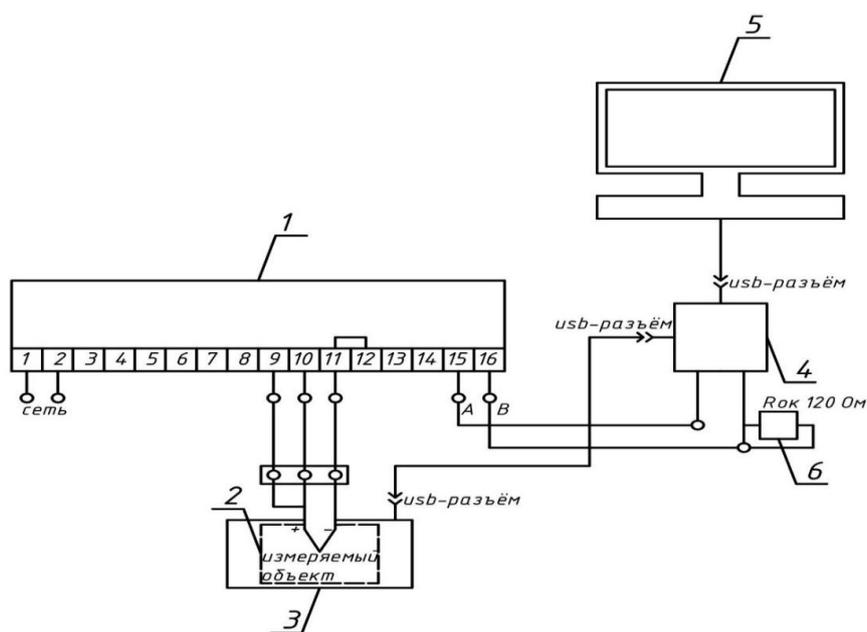


Рисунок 3 – Принципиальная схема лабораторной установки для исследования массообмена влажных нагретых материалов [6]:

1 – ПИД-регулятор; 2 – ёмкость с материалов;

3 – электронные весы; 4 – автоматический преобразователь интерфейсов; 5 – компьютер.

Таблица 1 – Значения экспериментального коэффициента A шихты ГОКов

| ГОК | A |
|--------------|------|
| Ковдорский | 54,2 |
| Коршуновский | 56,2 |
| Оленегорский | 49,5 |
| Стойленский | 63,6 |

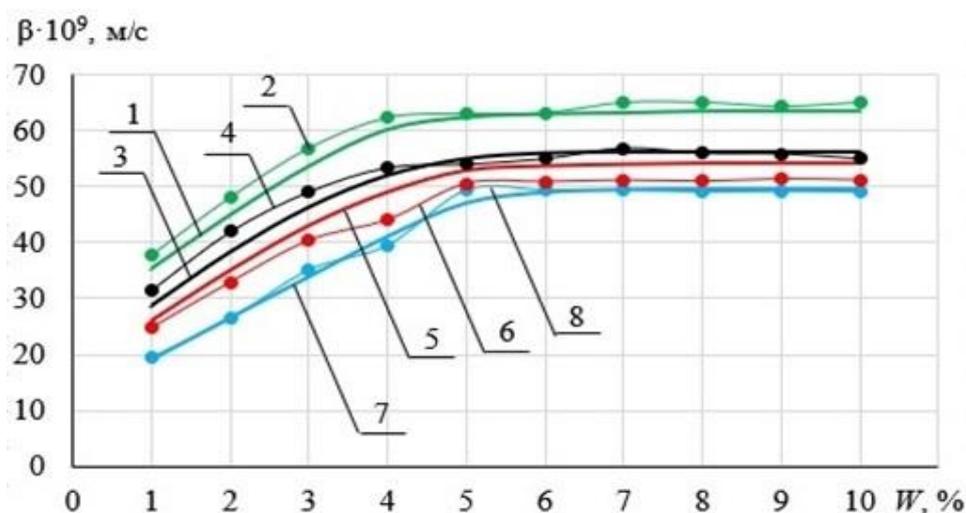


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента массоотдачи от относительной влажности шихты ГОКов: 1 – Стойленский; 2 – Коршуновский; 3 – Ковдорский; 4 – Оленегорский; 5 – Стойленский; 6 – Коршуновский; 7 – Ковдорский; 8 – Оленегорский

Анализ полученных данных (рисунок 4) показывает, что коэффициент β индивидуален для каждого из исследованных материалов и возрастает до некоторого критического значения относительной влажности, равного 4–5 %, а далее изменяется незначительно.

Третий раздел посвящён совершенствованию метода расчёта величины и параметров воздухообмен для конвейерных галерей ГОКов.

За основу взят аналитический метод расчёта, разработанный Г.В. Смольниковым, в котором предусмотрены расчёты для 2-х видов конвейерной транспортировки: с открытыми и закрытыми конвейерами соответственно. Расчёт выполняется с учётом теплотехнических требований к ограждающим конструкциям конвейерных галерей. Так, в диапазоне изменения температуры наружного воздуха от 0 °С до –50 °С при температуре внутреннего

воздуха 15 °С и относительной влажности 70 %, для определения требуемого сопротивления теплопередаче стен, покрытий и полов галерей влажных нагретых материалов можно пользоваться графическими зависимостями, представленными на рисунке 5.

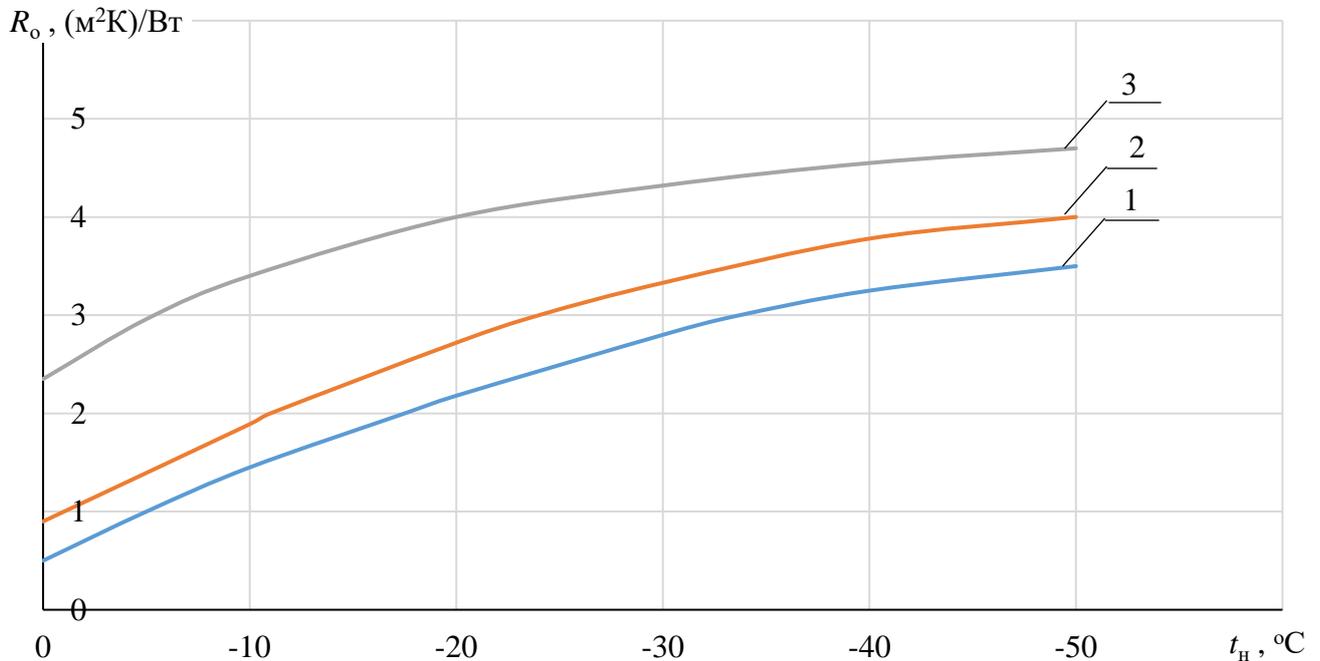


Рисунок 5 – Требуемое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций галерей влажных нагретых материалов при $t_{\text{вн}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\varphi_{\text{вн}} = 70 \%$: 1 – для стен; 2 – для покрытий; 3 – для полов

В отличие от существующего, в модернизированном методе расчёт требуемого сопротивления теплопередаче происходит на основании величины градусо-суток отопительного периода ГСОП, $^\circ\text{C}\cdot\text{сут}/\text{год}$:

$$\text{ГСОП} = (t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}) \cdot z_{\text{от}}, \quad (6)$$

где $t_{\text{вн}}$, $t_{\text{н}}$ – температуры соответственно внутреннего и наружного воздуха, $^\circ\text{C}$; $z_{\text{от}}$ – продолжительность отопительного периода, сут/год.

Кроме того, величина разности давления на наружной поверхности ограждения Δp_i , Па, необходимая при расчёте инфильтрации, в отличие от существующего метода, определяется по следующей формуле:

$$\Delta p_i = h_i \cdot (\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{вн}}) + 0,5 \cdot v_{\text{вс}}^2 \cdot \rho_{\text{н}} \cdot (C_{\text{н}} - C_3) \cdot K_1 - p_{\text{в}}, \quad (7)$$

где h_i – расстояние от верха окна до устья вытяжной шахты, м;
 $\gamma_n, \gamma_{вн}$ – соответственно удельный вес наружного и внутреннего воздуха, Н/м³;
 $v_{вс}$ – скорость ветра, м/с; ρ_n – плотность наружного воздуха, кг/м³;
 C_n, C_z – аэродинамические коэффициенты соответственно для наветренной и
заветренной поверхностей; K_1 – коэффициент учёта скоростного давления ветра;
 p_b – условно-постоянное давление в здании, Па.

Аэродинамические коэффициенты ограждающих конструкций галерей C принимаются по таблице 2, как и в существующем методе.

Таблица 2 – Значения аэродинамических коэффициентов ограждающих конструкций конвейерных галерей

| Тип галереи | Аэродинамические коэффициенты, C | | | |
|--|------------------------------------|-------------|---------------------------|--------|
| | Вертикальные ограждения | | Горизонтальные ограждения | |
| | Наветренные | Заветренные | Верхние | Нижние |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Наклонная одноконвейерная | + 0,80 | - 0,80 | - 0,85 | - 0,90 |
| Наклонная двухконвейерная | + 0,80 | - 0,50 | - 0,70 | - 0,85 |
| Горизонтальная надземная одноконвейерная | + 0,80 | - 0,80 | - 0,80 | - 0,85 |
| Горизонтальная надземная двухконвейерная | + 0,80 | - 0,45 | - 0,65 | - 0,85 |
| Горизонтальная наземная одноконвейерная | + 0,60 | - 0,40 | - 0,70 | - |
| Горизонтальная наземная двухконвейерная | + 0,60 | - 0,35 | - 0,55 | - |

Применение формул (6) и (7), связанных с дальнейшими расчётами величины и параметров воздухообмена, позволяет повысить их точность и достоверность при проектировании. Разработанный метод расчёта положен в основу программы для ЭВМ «Метод расчёта величины и параметров воздухообмена для помещений с тепловлагоизбытками» [8].

Четвёртый раздел посвящён результатам производственной проверки достоверности полученных в работе данных, а также проверке эффективности усовершенствованного метода расчёта величины и параметров воздухообмена. Производственные исследования проведены в галерее № 2 Коршуновского ГОКа в холодный период года. Данная галерея является горизонтальной

двухконвейерной, общая длина составляет 100 м. В галерее предусмотрена одна механическая приточная система для подачи воздуха. Удаление воздуха осуществлялось через шахту естественной вытяжки. Отопление – воздушное.

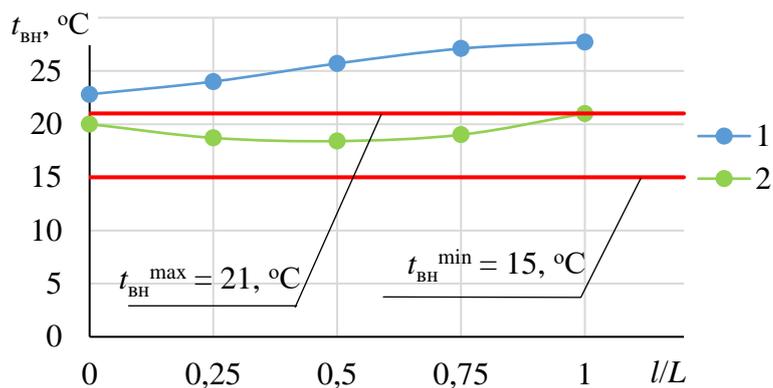
На первом этапе производственных исследований произведён аналитический расчёт теплового потока и количества водяных паров, поступающих от поверхности транспортируемых конвейерами материалов, а также определялись другие составляющие теплового баланса галереи, на основании которых рассчитывался необходимый воздухообмен и параметры воздушной среды в галерее. Расчёт выполнялся с применением программы для ЭВМ [8].

Далее, после установления расчётной производительности приточной установки, с целью оценки состояния микроклимата галереи, производились натурные измерения параметров внутренней воздушной среды. Исследования производились по методике, изложенной в СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» и включали замеры распределения относительной влажности, подвижности и температуры внутреннего воздуха в пространстве между конвейерами в двух сечениях галереи: 50 и 100 м от начала галереи соответственно. Относительная влажность и температура измерялись термогигрометром «Testo 609-N1», подвижность – крыльчатым анемометром ИСП-МГ4. Дополнительно измерялось влагосодержание внутреннего воздуха. Согласно методике, измерения вышеуказанных параметров производились на расстоянии от пола кратном 0,5 м, а далее усреднялись в каждом из сечений, а также по галерее в целом. Результаты замеров натуральных замеров параметров микроклимата представлены в таблице 2.

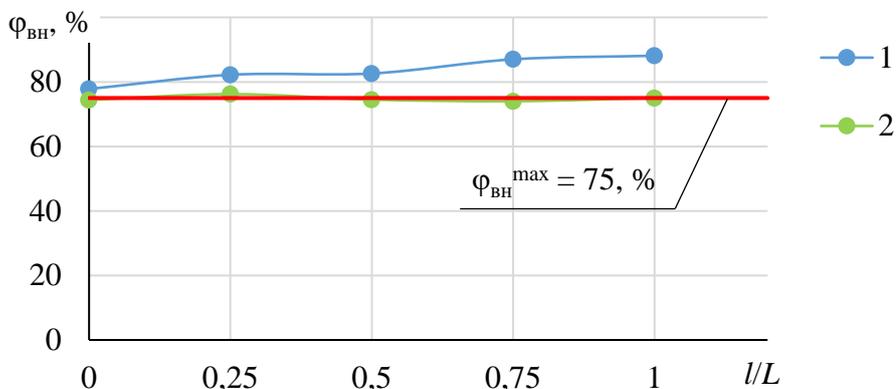
Величины тепло- и влаговыделения, определённые из тепловоздушных балансов галереи, отличаются от расчётных не более чем на 10 %. Установлено, что при расчётных параметрах состояние микроклимата в галерее соответствует требованиям нормативных документов. Данные таблицы 3 обобщены графически на рисунке 6.

Таблица 3 – Результаты натурного обследования микроклимата галереи № 2 ПАО «КГОК» при работе системы воздухообмена, рассчитанной на основе настоящих исследований

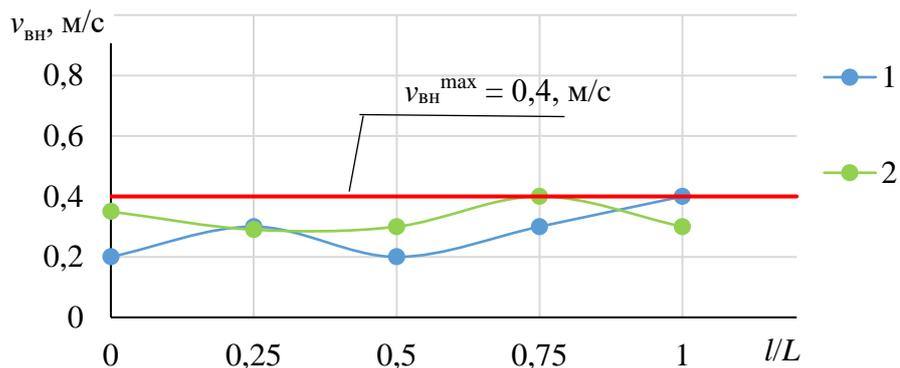
| Высота замера, м | Параметры микроклимата | | | |
|---|--------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------|
| | $t_{вн}, ^\circ\text{C}$ | $\varphi_{вн}, \%$ | $v_{вн}, \text{м/с}$ | $d_{вн}, \text{кг/кг с.в.}$ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1-е сечение галереи (50 м) | | | | |
| 0,5 | 19,2 | 68,2 | 0,3 | 8,3 |
| 1,0 | 21,1 | 70 | 0,3 | 9,8 |
| 1,5 | 19,5 | 74,5 | 0,4 | 12,2 |
| 2,0 | 20,5 | 76,4 | 0,4 | 12 |
| Средние значения по 1-му сечению: $t_{вн} = 20,1, ^\circ\text{C}$; $\varphi_{вн} = 72,3, \%$; $v_{вн} = 0,35, \text{м/с}$; $d_{вн} = 10,6 \cdot 10^{-3}, \text{кг/кг с.в.}$ | | | | |
| 2-е сечение галереи (100 м) | | | | |
| 0,5 | 21,3 | 74,4 | 0,4 | 11,9 |
| 1,0 | 21,2 | 76,2 | 0,3 | 10,6 |
| 1,5 | 21 | 74,5 | 0,3 | 11,9 |
| 2,0 | 20,9 | 74 | 0,4 | 12,4 |
| Средние значения по 2-му сечению: $t_{вн} = 21,1, ^\circ\text{C}$; $\varphi_{вн} = 74,7, \%$; $v_{вн} = 0,35, \text{м/с}$; $d_{вн} = 11,7 \cdot 10^{-3}, \text{кг/кг с.в.}$ | | | | |
| Средние значения по галерее в целом: $t_{вн} = 20,6, ^\circ\text{C}$; $\varphi_{вн} = 73,5, \%$; $v_{вн} = 0,35, \text{м/с}$; $d_{вн} = 11,15 \cdot 10^{-3}, \text{кг/кг с.в.}$ | | | | |



а



б



в

Рисунок 6 – Результаты производственных исследований микроклимата галереи № 2 ПАО «КГОК»: а – температура, б – относительная влажность, в – подвижность; 1 – исходное натурное обследование, 2 – натурное обследование после расчёта с применением данных настоящей работы

Анализ полученных данных показывает, что при расчётном воздухообмене параметры микроклимата галереи (относительная влажность, подвижность и температура воздуха) находятся в допустимых пределах, нормируемых нормативными документами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлены расчётные формулы для определения локальных и средних коэффициентов конвективной теплоотдачи влажных нагретых материалов ГОКов чёрной металлургии, необходимых при расчёте тепловыделений от поверхности данных материалов при конвейерной транспортировке.

2. Определены значения опытных коэффициентов влажных нагретых материалов ГОКов, необходимые для расчёта влаговыделений, поступающих от поверхности данных материалов.

3. С учётом требований современной нормативной литературы усовершенствован известный аналитический метод расчёта величины и параметров воздухообмена для конвейерных галерей ГОКов чёрной металлургии, в результате чего разработана, верифицирована и валидирована программа для ЭВМ «Метод расчёта величины и параметров воздухообмена для помещений с тепловлагоизбытками» [8].

Перспективы дальнейших исследований в данном направлении могут заключаться в разработке универсальных математических моделей теплообмена 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. Калинич И.В., Кулагин В.А. Экспериментальное исследование теплообмена нагретых материалов при конвейерной транспортировке. *Вестник ИрГТУ*. 2019. Том 23. № 3. 543–552; DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-543-552.

2. Калинич 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. DOI: 10.17516/1999-494X-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 и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и базы данных

5. Патент РФ № 073616. *Стенд для исследования теплообмена* / И.В. Калинин, В.А. Кулагин, Г.В. Смольников; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (RU). – № 2019137228/09; заявлен 19.11.2019, опубликован 13.01.2020.

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.

7. 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.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611728 РФ. *Метод расчёта величины и параметров воздухообмена для помещений с тепловлагоизбытками* / И.В. Калинин, В.А. Кулагин, Г.В. Смольников; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СФУ (RU). – № 2019666743; заявл. 17.12.2019; зарег. 07.02.2020.

статьи, опубликованные в других изданиях

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

материалы научно-технических конференций

10. Калинин И.В. Укрытие для конвейера. *Борисовские чтения: Матер. II Всерос. НТК*. Красноярск, 2019. 47–48.

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

12. 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.

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

14. 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.

15. Калинин 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., 2017. 948–952.

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

17. Калинин 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.

18. Калинин И.В., Смольников Г.В., Сакаш Г.В. Экспериментальное исследование теплообмена парящих материалов в условиях

транспортирования их конвейерами. *Актуальные проблемы архитектуры, строительства, энергоэффективности и экологии: Сб. матер. Междунар. НПК.* Тюмень, 2016. 178–182.

19. Калинин И.В., Смольников Г.В., Сакаш Г.В. К расчёту при проектировании систем вентиляции в конвейерных галереях горнообогатительных комбинатов. *В сборнике: Архитектура – Строительство – Транспорт. Материалы 72-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета.* Санкт-Петербург, 2016. 216–221.