

Б.И. Басок, чл.-кор. НАН Украины, проф., д.т.н., ORCID 0000-0002-8935-4248

А.В. Тимошенко, к.т.н., ORCID 0000-0001-6840-5491

Н.С. Корбут, ORCID 0000-0003-2766-0036

Институт технической теплофизики НАН Украины

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В СЛОЕ ТВЕРДОГО ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ГОРНЫХ ПОРОД МАГМАТИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Сдерживающим фактором к широкому применению безопасной, повышающей стойкость к пожарам, теплоизоляции на основе базальтовых волокон, является ее высокая себестоимость, обусловленная высокими удельными расходами энергии на ее производство. Одним из факторов повышающих энергоэффективность производства является утилизация ВЭР высокотемпературных продуктов сгорания. В качестве насадки высокотемпературного регенеративного теплообменника рассматривается базальтовая крошка. Цель работы состоит в исследовании процесса конвективного теплообмена воздуха в тонком слое базальтовой крошки. Приведены характеристики базальтового сырья, определены его структурные и линейные свойства. Проведена оценка интенсивности конвективного теплообмена в насадке. Приведена характеристика экспериментального стенда. Представлены результаты исследований. Установлено, что коэффициенты конвективной теплоотдачи для засыпок с толщиной слоя 1,5-3,0 характерных линейных размера дисперсной частицы в 4 раза меньше значений, полученных для плотных, протяженных слоев дисперсной системы. Высказаны предположения относительно полученных отличий.

Ключевые слова: теплоизоляция, базальты, конвективный теплообмен.

Введение

Экологически безопасная, долговечная и пожаростойкая тепловая изоляция на основе базальтовых супертонких волокон обладает совокупностью характеристик, представляющих интерес как для специализированных объектов и устройств, так и для объектов промышленного и гражданского строительства [1, 2]. Штапельное БСТВ – это совокупность волокон со средним диаметром 1-3 мкм. Они характеризуются широким температурным диапазоном применения (от -260 до +700°C), обладают высокой термовибростойкостью и низкой гигроскопичностью, удерживают первоначальную форму при длительной эксплуатации, химически инертны и сохраняют теплоизоляционные свойства длительный период [3, 4].

В технологии производства базальтовых волокон для получения расплава горных пород могут использоваться: ваграночный (рудно-термический), ванный, электродуговой или индукционный способы. Каждый из них обладает рядом преимуществ и недостатков. В настоящий момент в промышленности теплоизоляционных материалов наиболее освоенным и широко применяемым является ванный способ, используемый, в том числе, и в дуплекс-технологии. Промышленная дуплекс-технология и оборудование для производства БСТВ были созданы в Украине в 70-х годах XX ст., главное место в этой разработке занимали академические и отраслевые институты.

Суть дуплекс-технологии заключается в двойной обработке материала с получением на первом этапе ансамбля монофракционных грубых волокон, с последующей его раздувкой в штапельные супертонкие волокна на втором этапе технологии. Материал загружается в плавильную печь, где происходит его плавление (стеклообразование), дегазация и гомогенизация; из гомогенного расплава через фильеры вытягиваются грубые волокна, которые повторно расплавляются и раздуваются высокотемпературными продуктами сгорания природного газа в супертонкое штапельное волокно. Основным недостатком дуплекс-технологии является ее высокая энергоемкость. Подробный анализ технологических процессов показывает, что доля энергоресурсов, а это природный газ и электроэнергия, в общей себестоимости продукции составляет более 80%. При этом непосредственно на природный газ приходится 70-75% от этой величины. Объемы потребления природного газа на первом и втором этапах технологии приблизительно одинаковы.

В таблице 1 приводятся удельные энергетические показатели, характерные для типового технологического процесса.

Таблица 1 - Удельные энергетические показатели

| № пп | Наименование позиции | Единица измерения | Величина |
|------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------|
| 1 | Удельное потребление природного газа | ст. м ³ /кг БСТВ | 3,8...4,5 |
| 2 | Удельное потребление электроэнергии | кВт·час/кг БСТВ | 2,8...3,5 |

Работы по энергетическому совершенствованию дуплекс-технологии направлены на уменьшение регенеративных и рекуперативных потерь в технологическом оборудовании, устранении неорганизованного газообмена в высокотемпературных элементах ванной плавильной печи, глубокую утилизацию теплоты продуктов сгорания с возвращением части ВЭР в технологический цикл, интенсификацией процессов термообработки расплава базальта в ванной и фидере плавильной печи. Энергетическое совершенствование дуплекс-технологии преследует своей целью кардинальное снижение потребления природного газа на выпуск единицы готовой продукции. Расчетное снижение удельного потребления природного газа составляет более 2 раз.

Вопрос исследования процесса конвективного теплообмена в слое твердого дисперсного материала из основных горных пород касается части мероприятий по комплексному использованию теплоты продуктов сгорания после ванн плавильных печей с целью повышения их энергетической эффективности, продления межремонтного срока их эксплуатации, снижения удельного расхода теплоты на получение расплава. Утилизация теплоты отходящих газов осуществляется двумя способами: подогревом воздуха, поступающего на горение, и предварительным подогревом сырья, поступающего на плавление, гомогенизацию и дегазацию.

Цель работы состоит в исследовании нестационарного процесса конвективного теплообмена воздуха в плотном слое твердого дисперсного материала из горных пород магматического происхождения.

Задачи и методы исследования

Задача исследования состояла в изучении конвективного теплообмена воздушного потока в слое дисперсного материала – базальтовой крошки – при толщине слоя дисперсной системы составляющей 1,5-3,0 характерных линейных размера дисперсной частицы. Решение задачи осуществлялось с использованием экспериментальных и аналитических методов.

Для производства штапельного базальтового волокна в качестве сырья используются изверженные основные горные породы, которые относятся к ископаемым магматического происхождения (базальты, диабазы, амфиболиты). На территории Украины широко распространены основные горные породы, имеющие высокую природную химическую и термическую стойкость. Особенность пород местных месторождений состоит в их установившемся оптимальном минералогическом составе, низкой (относительно другого базальтового сырья) температуре плавления, широком температурном диапазоне границ кристаллизации базальтового стекла и отсутствии необходимости дополнительного шихтования перед варкой стекломассы [5].

Теплофизические свойства базальтовых пород представлены ниже (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2 – Теплофизические характеристики базальтов [6]

| Характеристики | Ед. изм. | Условие | Значения |
|------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------------|
| Удельная теплоемкость | кДж/(кг*К) | при 273 (К) | 0,85 |
| | | при 1473 (К) | 1,49 |
| Плотность | кг/м ³ | | 2600...3250 |
| Теплопроводность | Вт/(м*К) | средняя | 1,3 |
| | | диапазон | 0,44...3,5 |
| Температуропроводность | м ² /с | средняя | 6,29*10 ⁻⁷ |
| | | диапазон изменений | (3,44...13,45)*10 ⁻⁷ |

Теоретически базальтовые породы и расплавы из них оценивают по модулю кислотности M_k , характеризующего в первом приближении степень легкоплавкости сырья:

$$M_k = \frac{(SiO_2 + Al_2O_3)}{(CaO + MgO)}, \quad (1)$$

Основные горные породы, применяемые в производстве, имеют высокий модуль кислотности ($M_k > 2$), что положительно влияет на химическую и термическую стойкость волокна. В качестве примера в табл. 3 приведен M_k и химический состав базальта месторождения Янова Долина Ровенской обл.

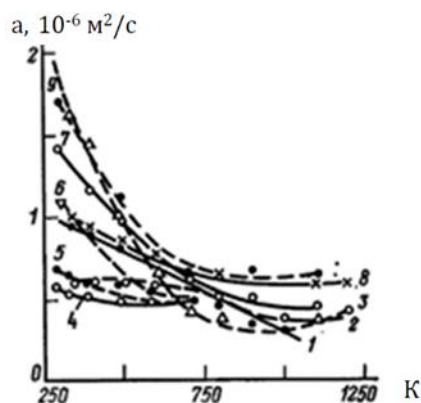


Рисунок 1 – Зависимость температуропроводности горных пород от температуры [6]: 1 – диорит; 2 – гранит; 3 – базальт; 5 – оливиновый базальт.

Таблица 3 – Химический состав базальта месторождения Янова Долина Ровенской обл.

| Массовая доля оксида, % | | | | | | | | |
|-------------------------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|------|------------------|----------------------------|
| SiO ₂ | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | FeO | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | R ₂ O | M _к по ф-ле (1) |
| 50,47 | 2,48 | 8,5 | 9,45 | 12,47 | 9,34 | 5,74 | 4,11 | 4,17 |

Определение линейных и структурных свойств объекта исследования

Засыпки дисперсных материалов характеризуют следующими геометрическими факторами [7]: размеры и форма частиц, поверхность частиц, распределение по гранулометрическому составу, плотность и порозность (пустотность) неподвижного дисперсного слоя. С целью определения необходимых для вычисления процессов переноса геометрических факторов, изучались частицы базальтового щебня размером от 2 до 19 мм. Это полидисперсный материал, форма частиц которого отличается от геометрических фигур правильной формы (рис. 2). Слой дисперсного материала из частиц неправильной формы условно заменяется слоем материала, состоящим из монодисперсных сферических частиц эквивалентных по объему, с диаметром $d_{э}$.



Рисунок 2 – Выборка базальтовой крошки

Эквивалентный диаметр засыпки дисперсного материала определялся двумя методами. Первый метод – интегральный – состоял в измерении объема V_i каждой i -й частицы из выборки. С использованием зависимости

$$d_{э,i} = \left(\frac{6V_i}{\pi} \right)^{1/3} \quad (2)$$

определяем значение эквивалентного диаметра для каждой i -й частицы выборки. После чего, средний эквивалентный диаметр выборки из N частиц определяется как среднее арифметическое значение

$$d_{э} = \frac{\sum_{i=1}^N d_{э,i}}{N} \quad (3)$$

Второй метод – статистический – состоял в измерении линейных размеров i -й частицы выборки (a , b , c) по трем взаимно перпендикулярным направлениям OX , OY , OZ . Эквивалентный линейный размер i -й частицы определялся как среднее арифметическое значение

$$d_{э,i} = \frac{a_i + b_i + c_i}{3} \quad (4)$$

Средний эквивалентный диаметр выборки из N частиц определялся выражением (3).

Средние эквивалентные диаметры для выборки из $N=86$ определенных интегральным и статистическим методами составили 8,9 мм и 8,8 мм, соответственно. Кривые распределения линейных размеров дисперсных частиц (a_i , b_i , c_i) и их эквивалентных диаметров $d_{э,i}$ представлены ниже (рис. 3, рис. 4).

Важнейшей характеристикой состояния дисперсных систем является порозность (пустотность) неподвижного слоя щебня (ε) [7]. Она зависит от формы, гранулометрического состава, размера и способа упаковки частиц. Пустотность щебня определяем расчетным путем, на основании предварительно установленных значений средней плотности зерен и насыпной плотности щебня по ГОСТу 8269.0-97* [8, разд. 4.16, 4.17]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{нас}}}{\rho_{\text{м}}} = 1 - \frac{1611}{2938} = 0,45, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{нас}} = 1611 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\rho_{\text{м}} = 2938 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

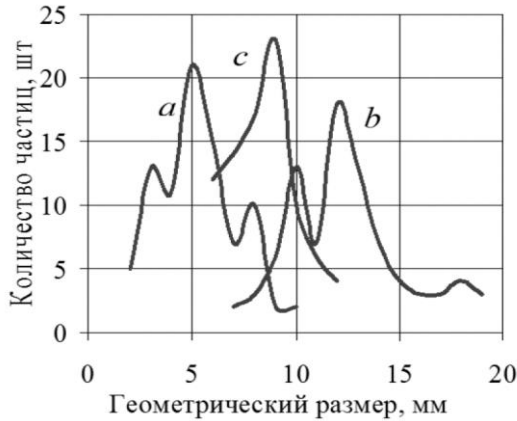


Рисунок 3 – Кривая распределения линейных размеров дисперсных частиц (a_i , b_i , c_i)

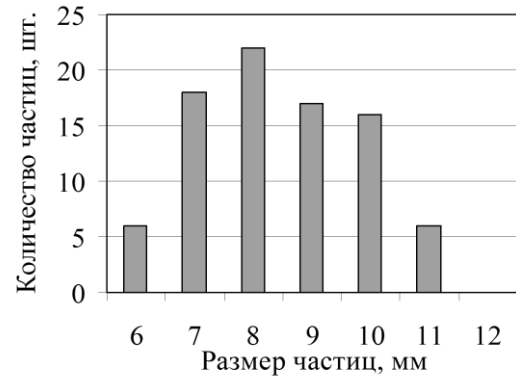


Рисунок 4 – Кривая распределение эквивалентных диаметров дисперсных частиц ($d_{3,i}$)

В дальнейших расчетах в качестве характерного линейного размера процесса принимается значение эквивалентного диаметра $d_3 = 8,8 \cdot 10^{-3}$ м.

Удельная расчетная поверхность контакта дисперсной системы составляет $374 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Интенсивность конвективного теплообмена в слое твердого дисперсного материала

Оценим величины безразмерного коэффициента теплоотдачи в слое дисперсного материала. Для определения коэффициентов теплоотдачи при движении теплоносителя в плотном неподвижном слое или в малоподвижном продуваемом слое, рекомендуются следующие критериальные уравнения Тимофеева, использующиеся для частиц различных размеров при любых значениях порозности слоя [9]:

при $20 < Re < 200$ $Nu = 0,106 \cdot Re,$ (6)

при $Re > 200$ $Nu = 0,610 \cdot Re^{0,67}.$ (7)

Коэффициент теплоотдачи в плотном слое дисперсного материала Касик и Хаппель получили в виде [10] (справедливо для области $10^2 < Re < 10^3$ и $Pr = 0,6 \div 3,0$):

$$Nu = \frac{0,93Re^{1/2}Pr^{1/3}}{(\varepsilon - 0,75(1 - \varepsilon)(\varepsilon - 0,2))^{1/2}} \quad (8)$$

где Re – вычислено по скорости стесненного потока.

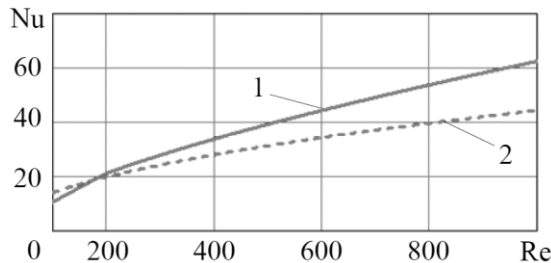


Рисунок 5 – Интенсивность конвективного теплообмена в слое дисперсного материала

1 – расчет по формулам (6), (7); 2 – расчет по формуле (8) (при $Pr=0,7$; $\varepsilon=0,45$)

На рис. 5 представлены числа Нуссельта, вычисленные с использованием зависимостей (6)-(8). В рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса наблюдаются расхождения в величинах интенсивности конвективного теплообмена более 20% как в одну, так и в другую стороны.

Коэффициент теплоотдачи вычисляем, используя в качестве характерного линейного размера процесса средний диаметр дисперсной частицы d_3

$$\alpha_F = Nu \frac{\lambda_B}{d_3} \quad (9)$$

При расчете процессов теплообмена в слоевых процессах рекомендуется использовать объемный коэффициент теплообмена α_V , который связан с поверхностным коэффициентом теплоотдачи соотношением [10]

$$\alpha_V = \eta \alpha_F (1 - \varepsilon) / d_3, \quad (10)$$

где η – коэффициент, зависящий от формы частиц (для цилиндрических 4,0; для сферических 6,0; для шихты шахтных печей 7,5). Величины коэффициентов объемного теплообмена α_V и теплоотдачи с поверхности α_F для условий проведения эксперимента – $Re = 500$; $Pr = 0,7$; $\varepsilon = 0,45$; $T_{B,0} = 100$ °C; $\eta = 6$ – представлены на рис. 6.

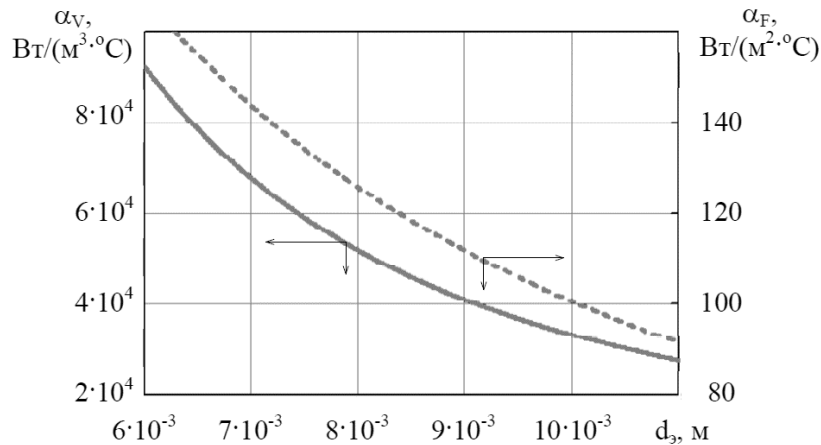


Рисунок 6 – Объемный коэффициент теплообмена и коэффициент теплоотдачи с поверхности

Теплообмен в неподвижном плотном слое удовлетворительно описывается задачей Шумана. При этом совместно рассматриваются уравнения нестационарного теплообмена твердой фазы дисперсной системы и уравнение нестационарного теплообмена потока воздуха, проходящего через дисперсную систему. Физическая формулировка задачи подразумевает, что слой дисперсного материала состоит из термически тонких частиц одинакового размера, теплообмен между потоком воздуха и слоем дисперсного материала определяется законом Ньютона, коэффициент α_F одинаков по длине и сечению слоя; теплофизические свойства воздуха и частиц не зависят от температуры; передача теплоты в воздухе и в слое теплопроводностью отсутствует; поток воздуха равномерно распределен по сечению слоя [10].

Исследуемая система имеет толщину слоя дисперсного материала – линейного размера в направлении движения воздушного потока – на порядок меньшую двух других линейных размеров системы. Ввиду этого, представляется целесообразным упростить математическое описание нестационарного процесса теплообмена в слое дисперсного материала и представить его выражением

$$\frac{d\Theta}{dFo} = \Phi \cdot \Theta, \quad (11)$$

где $\Theta = \frac{T_{B,0} - T_{M,\tau}}{T_{B,0} - T_{M,0}}$ безразмерная температура слоя дисперсного материала; $Fo = \frac{a \cdot \tau}{d_3^2}$ безразмерное время;

$\Phi = \frac{\alpha_V \cdot d_3^2}{\lambda \cdot (1 - \varepsilon)}$ постоянный безразмерный коэффициент. Уравнение (11) замыкалось следующим граничным условием $\Theta(0) = 1$. Решение уравнения (11) получено в виде

$$\Theta(Fo) = e^{-\Phi \cdot Fo}. \quad (12)$$

Решение (12) получено при допущениях, тождественных допущениям в задаче Шумана, кроме величины температуры воздуха, которая принимается постоянной и не зависящей от времени.

Экспериментальные исследования конвективного теплообмена в слое дисперсного материала

В качестве исследуемого материала использовалась базальтовая крошка из месторождения Янова Долина (Украина) (табл. 2, 3).

Исследование интенсивности конвективного теплообмена между воздушным потоком и плотным слоем твердого дисперсного материала выполняли на лабораторном стенде, принципиальная схема которого приведена на рис. 7, а технические характеристики в табл. 4.

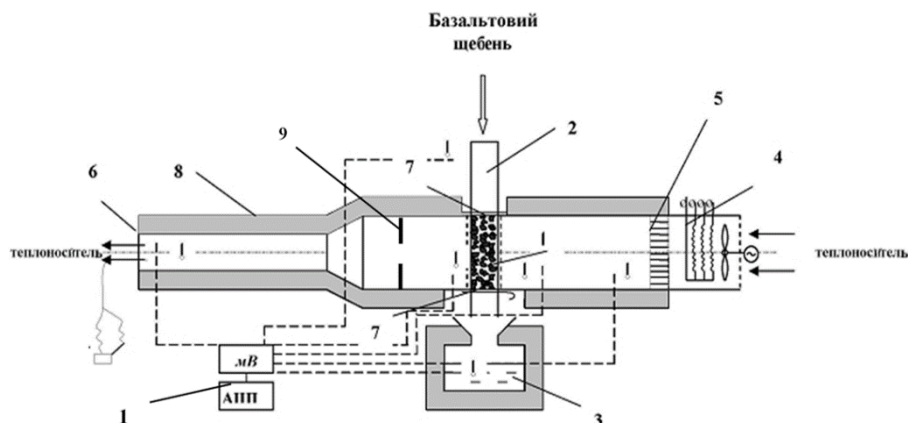


Рисунок 7 – Принципиальная схема экспериментального стенда:

1 – участок, формирующий слой базальтового щебня; 2 – камера предварительного нахождения материала; 3 – сосуд калориметрический; 4 – теплогенератор; 5 – решетка распределительная; 6 – участок измерения объемного расхода теплоносителя; 7 – клапана-отсекатели; 8 – тепловая изоляция, 9 – регулируемая заслонка, 10 - автоматизированная система контроля и учета температур.

Элементы стенда теплоизолированы (8), при составлении тепловых балансов рекуперативные потери теплоты не учитываются. В теплогенераторе (4) осуществляется автоматическое поддержание заданной температуры и расхода теплоносителя. Контроль и учет температур в различных элементах стенда осуществляется автоматизированной системой на основе приборов УКТ-38, АС-2 и ЭВМ (10).

Поток подогретого воздуха равномерно подается на распределительные решетки (5) ограничивающие объем (1), предназначенный для засыпки базальтового щебня. Толщина засыпки регулируется (контролируется) расположением распределительных решеток (5). Опыт начинается по достижении контролируемыми параметрами постоянных значений (выходу в стационарный режим). Навеска материала (базальтового щебня) помещается в камеру предварительного нахождения (2). Открывается верхний клапан-отсекатель (7) и навеска падает в экспериментальный участок (1), полностью заполняя пространство между распределительными решетками. Начинается нагрев базальтового щебня горячим воздухом. Масса навески и ее начальная температура известны. Во время опыта осуществляется непрерывный контроль температур теплоносителя до слоя, после слоя, в месте измерения расхода теплоносителя, температуры среды в сосуде калориметрическом, температуры окружающего воздуха.

Таблица 4 – Технические характеристики стенда

| № пп | Наименование характеристики | Ед.изм. | Величина |
|------|--|----------------|---------------|
| 1 | Массовый расход теплоносителя | кг/час | до 100 |
| 2 | Температура теплоносителя | °С | до 150 |
| 3 | Скорость теплоносителя в сечении перед засыпкой | м/с | до 0,8 |
| 4 | Максимальный напор в системе | Па | 80 |
| 5 | Объем камеры с материалом | м ³ | 0,001 |
| 6 | Линейные размеры камеры с материалом (высота/ ширина/ толщина) | м | 0,2/0,2/0,025 |
| 7 | Установлена электрическая мощность | кВт | до 12 |

По достижении температуры теплоносителя после слоя значения, равного значению температуры до слоя, открывается нижний клапан-отсекатель (7). Нагретая навеска падает в сосуд калориметрический (3). Масса жидкости в сосуде и ее температура известны. Масса навески известна. Средняя температура навески базальтового щебня – искомая величина. По достижении температуры в сосуде калориметрическом постоянного значения опыт прекращается. Рабочий участок (1) позволяет исследовать теплообмен в засыпках различной толщины - 15, 20, 25 мм.

Составляя тепловой баланс процесса в сосуде калориметрическом определяется количество теплоты, аккумулированное навеской базальтового щебня, и ее средняя температура. Используя уравнение теплопередачи и методику для определения поверхности контакта в засыпке с известным средним

медианным размером частицы, определяется величина среднего коэффициента теплопередачи в слое. Коэффициент интенсивности теплообмена определяется при начальном температурном напоре.

Результаты

Экспериментально определялось изменение во времени температуры потока воздуха до ($T_{B,0}$) и после ($T_{B,\tau}$) камеры с базальтовой крошкой. Приводится, определенное калориметрическим методом, значение средней температуры засыпки (\bar{T}_M). Кроме того, на рис. 8. приводится изменение во времени средней температуры засыпки ($T_{M,\tau}$) полученное расчетным путем.

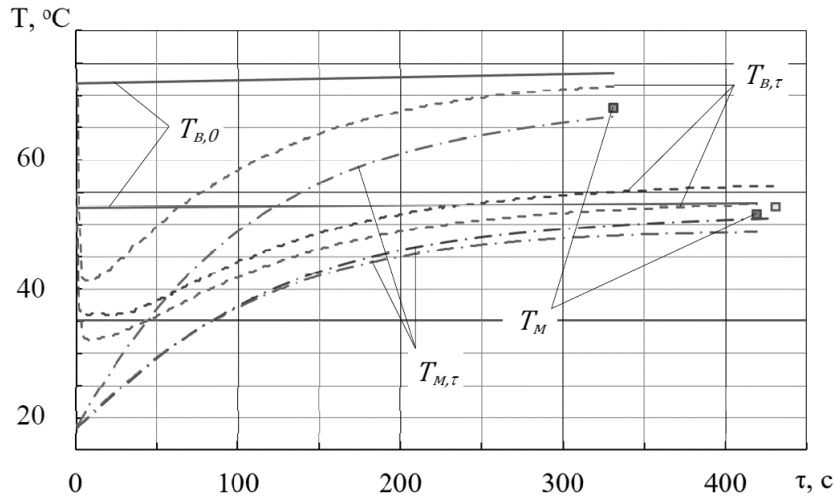


Рисунок 8 – Изменение температур воздуха и материала во времени

Результаты исследования обобщались в виде безразмерной зависимости $\Theta = f(Fo)$. На рис. 9. представлена кривая (1) ($\alpha_V = 4,3 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$), полученная с использованием зависимости (12) для условий проведения натурального эксперимента. На участке $Fo \geq 1,5$ совокупность экспериментальных точек хорошо описывается уравнением (12) с показателем $\Phi = 2,07951$, кривая (2). Показателю $\Phi = 2,07951$ соответствует значение коэффициента объемного теплообмена $\alpha_V = 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$, а ему, в свою очередь, значение коэффициента теплоотдачи с поверхности $\alpha_F = 27 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$. Таким образом, на участке $Fo \geq 1,5$ значения коэффициентов теплоотдачи, определенные экспериментальным путем, отличаются от расчетных значений более чем в 4 раза.

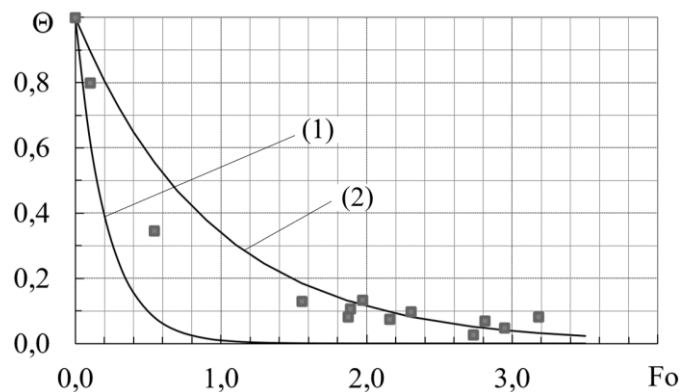


Рисунок 9 – Обобщение результатов исследований

Выводы

1. Высокая энергоемкость производства безопасной, долговечной и пожаростойкой тепловой изоляции на основе базальтовых волокон сдерживает ее широкое применение в промышленном и гражданском строительстве. В настоящее время доля энергоресурсов в себестоимости тепловой изоляции достигает 80%.
2. Использование дисперсных систем на основе пород магматического происхождения в качестве высокотемпературных насадок в системах использования ВЭР высокотемпературных продуктов сгорания природного газа позволяет вернуть (регенерировать) часть энергии в технологический процесс и существенно снизить величину энергетических потерь с продуктами сгорания.

3. В случае, когда толщина слоя дисперсной системы соизмерима с линейным размером дисперсной частицы, использование традиционных зависимостей, описывающих конвективный теплообмен в плотном неподвижном дисперсном слое, дает завышенные в 4 раза значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности.

4. Причины отличия экспериментальных данных от результатов, полученных для плотных дисперсных слоев, видятся в: а) невыполнении условия равномерного обтекания воздушным потоком дисперсной системы – для слоев, в которых линейный размер в направлении движения воздушного потока значительно превосходит характерный линейный размер дисперсной частицы, эти эффекты нивелируются; для условно тонких слоев в которых линейный размер слоя в направлении движения теплоносителя составляет 1,5-3,0 линейных размера дисперсной частицы, выравнивания параметров воздушного потока не происходит; б) невыполнении условия равенства коэффициентов теплоотдачи по толщине слоя, как следствия неравномерности их обтекания.

Список использованной литературы

1. Джигирис Д.Д. Основы производства базальтовых волокон и изделий / Д.Д. Джигирис, М.Ф. Махова. М.: Теплоэнергетик, 2002. - 411 с.

2. Релаксационные эффекты в неравновесных конденсированных системах. Базальты: от извержения до волокна / Аблесимов Н.Е., Земцов А.Н. – Москва: РАН Дальневосточное отделение. Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина, 2010. – 400 с.

3. Татаринцева О.С. Базальтовые технологии сегодня: состояние и перспективы [Электронный ресурс]: (Технология и оборудование химической, биотехнолог. и пищев. промышл.: Матер. 3-й Всес. конф. студ., аспирант. и молод. ученых с межд. участн. (28-30 апр. 2010 г., г. Бийск), В 2-х ч.; ч.1/Алт. гос. тех. ун-т, БТИ.-Бийск: Изд-во Алт. гос. тех. ун-т, 2010 - с. 7-12. Режим доступа к журн.: http://www.bti.secna.ru/mahipp/tech_obor_him_biolg_pish_prom_2010/sekcij_1.pdf Название с экрана.

4. ТУУ В.2.7.88 023.025-96 Холсты из микро, ультра, супертонких и стекломикрокристаллических стеклянных штапельных волокон из горных пород

5. Минерально-сырьевая база горных пород Украины для производства волокон. Аналитический обзор / В.И. Трефилов, М.Ф. Махова, Д.Д. Джигирис [и др.] // Промышленность строительных материалов. Серия 6. Промышленность полимерных, мягких кровельных и теплоизоляционных строительных материалов. – 1992. – Выпуск 2. – с. 88.

6. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (Петрофизика). Справочник геофизика/ Под. ред. Н.Б. Дортман, - 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Недра, 1984, 455 с.

7. Муштаев В.И. Сушка дисперсных материалов / Муштаев В.И., Ульянов В.М. М.: Химия, 1988, - 352 с.

8. ГОСТ 8269.0-97* Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний.

9. С.С. Кутателадзе Справочник по теплопередаче / Кутателадзе С.С., Боришанский В. М. Л.; М: Госэнергоиздат, 1958, - С.138-139.

10. Б.С. Матрюков Теплофизика металлургических процессов: Учебник для вузов. / Матрюков Б.С. – М. МИСИС, 1996.- С. 52.

УДК 666.1.031.2, 666.19

Б.І. Басок, чл.-кор. НАН України, проф., д.т.н., ORCID 0000-0002-8935-4248

А.В. Тимошенко, к.т.н., ORCID 0000-0001-6840-5491

Н.С. Корбут, ORCID 0000-0003-2766-0036

Інститут технічної теплофізики НАН України

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ В ШАРІ ТВЕРДОГО ДИСПЕРСНОГО МАТЕРІАЛУ З ГІРСЬКИХ ПОРІД МАГМАТИЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Причиною виникнення катастрофічних пожеж у багатопверхових житлових будинках є синтетична або, що містить синтетичні в'язучі теплова ізоляція. Стримуючим фактором до широкого впровадження ефективної, безпечної теплової ізоляції на основі базальтових волокон, що підвищує стійкість до пожеж, є її висока собівартість, обумовлена високими питомими витратами енергії на її виробництво. Одним з факторів, що підвищують енергоефективність виробництва є утилізація ВЕР високотемпературних продуктів згорання. В якості насадки високотемпературного регенеративного теплообмінного апарату розглядається дисперсна система з базальтової крихти. Мета роботи полягає в дослідженні нестационарного процесу конвективного теплообміну повітря в шарі твердого дисперсного матеріалу з гірських порід магматичного походження. Наведено характеристики базальтової сировини, визначено її структурні та лінійні властивості. Проведена аналітична оцінка інтенсивності конвективного теплообміну в насадці. Наведено опис і характеристика експериментального стенду.

Представлено результати експериментальних досліджень нестационарного конвективного теплообміну в дисперсній системі на основі базальтової крихти. Встановлено, що коефіцієнти тепловіддачі з поверхні, отримані експериментальним шляхом, для засипок дисперсних матеріалів з товщиною шару 1,5-3,0 характерних лінійних розміри дисперсної частинки виявилися в 4 рази менші значень, отриманих для щільних, протяжних шарів дисперсної системи. Висловлено припущення щодо отриманих відмінностей.

Ключові слова: теплоізоляція, базальти, конвективний теплообмін.

B. Basok, Cor. Mem. NAS of Ukraine, Prof., Dr. Eng. Sc., ORCID 0000-0002-8935-4248

A. Timoshchenko, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-6840-5491

N. Korbut, ORCID 0000-0003-2766-0036

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF CONVECTIVE HEAT EXCHANGE IN THE LAYER OF SOLID DISPERSE MATERIAL FROM MOUNTAIN ROCKS OF MAGMATIC ORIGIN

The cause of catastrophic fires in high-rise buildings is the synthetic thermal insulation or the insulation containing synthetic components. The deterrent to the widespread use of safe, fire-resistant, thermal insulation based on basalt fibers is its high cost, due to the high specific energy consumption for its production. One of the factors that increase the energy efficiency of production is the utilization of the secondary power resource of high-temperature combustion products. As the nozzle of the high-temperature regenerative heat exchanger, is considered the disperse system of the basalt rubble. The aim of the work is to study the non-stationary process of convective heat exchange of air in a layer of solid dispersed material from rocks of magmatic origin. The characteristics of basalt rubble are given, its structural and linear properties are determined. An analytical assessment of the intensity of convective heat transfer in the nozzle are carried out. The description and characteristics of the experimental stand is given. The results of experimental studies of non-stationary convective heat transfer in a dispersed system based on basalt rubble are presented. It has been established that the experimentally obtained heat transfer coefficients for nozzle of dispersed materials with a layer thickness of 1.5–3.0 characteristic linear sizes of a dispersed particle turned out to be 4 times less than the values obtained for dense, extended layers of the dispersed system. Assumptions are made regarding the differences obtained.

Key words: thermal insulation, basalts, convective heat exchange.

References

1. Dzhigiris D.D. Osnovy proizvodstva bazal'tovykh volokon i izdeliy / D.D. Dzhigiris, M.F. Ma-khova. M.: Teploenergetik, 2002. - 411 s.
2. Relaksatsionnyye efekty v neravnesnykh kondensirovannykh sistemakh. Bazal'ty: ot izverzheniya do volokna / Ablesimov N.Ye., Zemtsov A.N. – Moskva: RAN Dal'nevostochnoye otdeleniye. Institut tektoniki i geo-fi-ziki im. YU.A. Kosygina, 2010. – 400 s.
3. Tatarintseva O.S. Bazal'tovyte tekhnologii segodnya: sostoyaniye i perspektivy [Elektronnyy re-surs]: (Tekhnologiya i oborudovaniye khimicheskoy, biotekhnolog. i pishchev. promyshl.: Mater. 3-y Vses. konf. stud., aspir. i molod. uchenykh s mezhd. uchastn. (28-30 apr. 2010 g., g. Biysk), V 2-kh ch.;ch.1/Alt. gos. tekhn. un-t, BTI.-Biysk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-t, 2010 - c. 7-12. Rezhim dostupa k zhurn.: http://www.bti.secna.ru/mahipp/tech_obor_him_biolog_pish_prom_2010/sekciy_1.pdf Nazvaniye s ekrana.
4. TUU V.2.7.88 023.025-96 Kholsty iz mikro, ul'tra, supertonkikh i steklomikrokristallicheskikh steklyannykh shtapel'nykh volokon iz gornykh porod.
5. Mineral'no-syr'yevaya baza gornykh porod Ukrainy dlya proizvodstva volokon. Analiticheskiy obzor / V.I. Trefilov, M.F. Makhova, D.D. Dzhigiris [i dr.] // Promyshlennost' stroitel'nykh materialov. Seriya 6. Promyshlennost' polimernykh, myagkikh krovel'nykh i teploizolyatsionnykh stroitel'nykh materialov. – 1992. – Vypusk 2. – s. 88.
6. Fizicheskiye svoystva gornykh porod i poleznykh iskopayemykh (Petrofizika). Spravochnik geofizi-ka/ Pod. red. N.B. Dortman, - 2-ye izd., pererab. i dop.- M.: Nedra, 1984, 455 s.
7. Mushtayev V.I. Sushka dispersnykh materialov / Mushtayev V.I., Ul'yanov V.M. M.: Khimiya, 1988, - 352 s.
8. GOST 8269.0-97* Shcheben' i graviy iz plotnykh gornykh porod i otkhodov promyshlennogo proizvodstva dlya stroitel'nykh rabot. Metody fiziko-mekhanicheskikh ispytaniy.
9. S.S. Kutateladze Spravochnik po teploperedache / Kutateladze S.S., Borishanskiy V. M. L.; M: Gosenergoizdat, 1958, - S.138-139.
10. B.S. Mastyukov Teplofizika metallurgicheskikh protsessov: Uchebnyk dlya vuzov. / Mastyukov B.S. – M. MISIS , 1996.- S. 52.

Надійшла 13.08.2018

Received 13.08.2018