

Представлені результати експериментального дослідження теплообміну між газовим середовищем і щільним шаром гранульованого матеріалу. Визначено, що при деякому наближенні температури матеріалу до температури повітря на вході темп нагріву різко знижується, що слід враховувати при розрахунках теплоаккумуляторів. Встановлено, що зміна коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну в часі підпорядковується рівнянню класу сигмоїд

Ключові слова: теплообмін, гранульований матеріал, рухомий шар, нерухомий, газовий потік, температурні криві

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена между газовой средой и плотным слоем гранулированного материала. Определено, что при некотором приближении температуры материала к температуре воздуха на входе темп нагрева резко снижается, что следует учитывать при расчетах теплоаккумуляторов. Установлено, что изменение коэффициента межкомпонентного теплообмена во времени подчиняется уравнению класса сигмоид

Ключевые слова: теплообмен, гранулированный материал, движущийся слой, неподвижный, газовый поток, температурные кривые

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПРОДУВАЕМОМ ПЛОТНОМ СЛОЕ ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. В. Солодка
Аспирант*

E-mail: solodkaya140619@gmail.com

Н. В. Волгушева
Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: n-volgusheva@mail.ru

И. Л. Бошкова
Доктор технических наук, доцент*

E-mail: ira_boshkova@mail.ru

А. С. Титлов
Доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой**

E-mail: titlov1959@gmail.com

А. В. Рожнецев
Доктор технических наук, профессор**

E-mail: rozhentsev.av@gmail.com

*Кафедра теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей
Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики
им. Мартыновского Одесской национальной академии пищевых технологий
ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082
**Кафедра теплоэнергетик и трубопроводного транспорта энергоносителей
Одесская национальная академия пищевых технологий
ул. Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65039

1. Введение

Использование в теплоэнергетике теплоносителей в виде гранулированного материала позволяет существенно интенсифицировать процессы тепло- и массообмена [1]. Область исследований данной работы непосредственно относится к оптимизации аккумуляторов теплоты регенеративного типа. Нагретый газ из вытяжных устройств, к примеру, пищевых производств, проходя через плотный слой гранулированного материала, отдает свою теплоту. Аккумулярованную теплоту затем можно использовать в различных целях.

Регенеративные теплообменники с плотным слоем, движущимся и неподвижным, характеризуются высокой тепловой эффективностью, компактностью, небольшой массой, простой конструкции, надежностью, что позволяет обеспечить значительную производительность

[2, 3]. Потенциал применимости гранулированного материала в качестве промежуточного теплоносителя в аккумуляторах и теплоутилизаторах существенен [4]. Представляется целесообразным применение теплоаккумуляторов и теплоутилизаторов с гранулированной насадкой на производствах, которые характеризуются относительно невысоким температурным уровнем отходящих газов. Однако для промышленного внедрения недостаточно надежных данных по теплообмену между плотным слоем гранул и газом. Это определяет актуальность исследования процессов межкомпонентного теплообмена в слое гранулированного материала.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Перенос теплоты к частицам от потока газа, проходящего через слой дисперсного материала, определяет

во многих случаях скорость и устойчивость процессов, протекающих между твердым и газовым компонентом [4]. При проектировании теплообменников как регенеративных систем необходимо располагать сведениями о влиянии ряда факторов на теплообмен между частицами и газом. Определяющее влияние на теплообмен оказывает расход теплоносителей, длительность цикла [5], размер частиц и особенности их укладки [1, 6]. С целью оптимизации процесса в [6] рассматривается работа теплообменников, которые используют насадку из материалов различной геометрии: сферические частицы, кольца, брикеты (Spherical particles, baffle bricks, Raschig rings).

Результаты отдельных исследований показывают, что интенсивность теплообмена в неподвижном слое выше, чем в движущемся, что объясняется некоторым разрушением слоя при его движении [7]. Однако не отмечается, при какой скорости описываемые эффекты начинают проявляться. Следует отметить, что материалы строгой геометрии не являются распространенными, что ограничивает область применимости результатов.

Особую сложность представляет получение устойчивых аналитических или эмпирических зависимостей, которые позволили бы проводить оценку тепловых характеристик, таких как отводимое (подводимое) количество теплоты и коэффициент межкомпонентного теплообмена. Для некоторых случаев эта задача решена. В [8] теоретически исследованы закономерности процессов нестационарного теплообмена потока газа с потоком гранулированного материала. В результате определена связь скорости теплопереноса с конструктивными и режимными параметрами процесса. Разработана ячеечная математическая модель регенеративного процесса в теплообменнике с подвижной гранулированной насадкой [8]. Для проведения расчетов теплообмена по аналитическим зависимостям, полученным на основе математических моделей [8, 9], необходимы надежные данные по коэффициентам межкомпонентного теплообмена. Предложена модель [10], которая позволяет при применении численного метода сеток получать данные о тепловом состоянии слоя. Для расчетов также необходимы данные по коэффициентам межкомпонентного теплообмена. Теоретическое и экспериментальное исследование теплопереноса в плотном слое [11] показало, что при использовании плотного слоя для эффективной аккумуляции тепловой энергии число Био должно быть как можно более низким, чтобы тепловое сопротивление внутри твердого тела не становилось доминирующим. Следует отметить, что точность определения числа Био зависит от точности значения коэффициентов теплообмена. В [12] приведена сравнительная оценка данных по обобщенным зависимостям для коэффициента межкомпонентного теплообмена, полученным различными авторами. В большинстве случаев указывается, что критерием, определяющим теплообмен, является число Рейнольдса. Определяющими параметрами также могут быть число Архимеда, число Стентона и число Фруда. Зависимости получены для тел простой геометрии, таких как шар и цилиндр [12].

Необходимость проведения исследований теплообмена в продуваемом плотном слое обуславливает следующее. В настоящее время нет конкретных данных

по особенностям теплообмена для слоя гранулированного материала с частицами произвольной формы, такими как керамзит и гравий. В то же время эти материалы привлекательны по своим теплофизическим свойствам, доступности и стоимости для использования в качестве гранулированной теплоаккумулирующей насадки. Кроме того, как видно из анализа литературных данных, для проведения тепловых расчетов необходимо располагать значениями коэффициентов межкомпонентного теплообмена, определение которых составляет отдельную научную задачу.

3. Цели и задачи исследования

Целью исследования являлось определение условий интенсификации теплообмена между плотным слоем частиц и потоком воздуха в теплоаккумуляторе с гранулированной насадкой. Это даст возможность эффективно утилизировать теплоту из вытяжных устройств на производствах, которые характеризуются относительно невысоким температурным уровнем отходящих газов.

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

- на основе экспериментального исследования получить рекомендации относительно выбора рациональных условий работы теплоаккумулятора;
- определить влияние длительности процесса, скорости движения и температуры газа, вида гранулированного материала на интенсивность теплообмена;
- сопоставить интенсивность теплообмена для движущегося и неподвижного слоя при использовании керамзита и гравия в качестве гранулированного материала;
- установить характер изменения коэффициента межкомпонентного теплообмена во времени и определяющие параметры, влияющие на значение коэффициента межкомпонентного теплообмена.

4. Материалы и методы исследования

4.1. Характеристики материалов

Для исследований в качестве гранулированных материалов выбраны гравий и керамзит. Предварительно была проведена оценка основных геометрических характеристик слоя и частиц. Важными характеристиками слоя гранулированных материалов, которые необходимы для проведения расчетов тепловых характеристик процесса теплообмена и анализа полученных результатов, являются: порозность слоя ϵ и эквивалентный диаметр частиц \bar{d}_s [13]. Получено, что порозность слоя керамзита $\epsilon_k=0,47$, порозность слоя гравия $\epsilon_r=0,5$. Свойства гранулированных материалов, необходимые для расчета тепловых характеристик теплообмена между воздухом и слоем материала, приведены в табл. 1.

Материал, применяемый в эксперименте, является полидисперсным, для которого эквивалентный диаметр частиц определяется как средневзвешенный по поверхности в соответствии с зависимостью (1):

$$\bar{d}_s = \left(\sum_{i=1}^n \frac{m_i \phi_i}{d_i} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где n – число фракций в смеси, m_i – массовое содержание i -той фракции в смеси, кг/кг; d_i – размер частиц i -той фракции; φ_i – коэффициент формы частиц. Коэффициент φ_i , характеризующий отклонение формы частиц от сферической, для шариков равен единице, а для частиц другой формы может быть найден по рекомендациям [13]: $\varphi_i = \frac{F}{F_0}$, где F_0 – площадь поверхности идеального тела (шар), F – реальная площадь поверхности гранулы i -той фракции. Для керамзита исходные данные и результаты приведены в табл. 2.

Таблица 1

Основные свойства гранулированных материалов

Материал	Теплоёмкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Плотность, кг/м ³	Высота насадки, м	Площадь сечения, м
Гравий	840	0,4-0,93	1950	0,25–0,52	0,1
Керамзит	750	0,16-0,2	816–950		

Таблица 2

Геометрические характеристики фракций керамзита

№ i -той фракции	d_i , м	F_0 , м ²	F , м ²	φ_i	$m \cdot 10^2$, кг	n	m_i , кг
1	0,032	$1,52 \cdot 10^{-3}$	$22 \cdot 10^{-2}$	1,45	4,43	30	0,525
2	0,028	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-2}$	1,57	2,53	29	0,2897
3	0,025	$0,82 \cdot 10^{-3}$	$13 \cdot 10^{-2}$	1,58	1,77	13	0,0908
4	0,019	$0,51 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	1,47	0,87	16	0,0549
5	0,018	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-2}$	1,4	0,84	12	0,0398

Результаты расчета геометрических характеристик фракций гравия приведены в табл. 3.

Таблица 3

Геометрические характеристики фракций гравия

№ i -той фракции	d_i , м	F_0 , м ²	F , м ²	φ_i	$m \cdot 10^2$, кг	n	m_i , кг
1	0,0267	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$18 \cdot 10^{-4}$	1,24	1,01	33	0,367
2	0,0317	$1,54 \cdot 10^{-3}$	$22 \cdot 10^{-4}$	1,43	1,11	19	0,2323
3	0,0276	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$19 \cdot 10^{-4}$	1,26	1,07	20	0,2357
4	0,0266	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$17 \cdot 10^{-4}$	1,31	0,85	11	0,103
5	0,0203	$0,69 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-4}$	1,37	0,33	17	0,0618

В соответствии с данными по фракциям (табл. 2, 3), получено, что эквивалентный диаметр керамзита $\bar{d}_s = 0,018$ м, для гравия $\bar{d}_s = 0,021$ м.

4. 2. Схема экспериментальной установки и методика исследования

Схема экспериментальной установки, разработанная авторами непосредственно для исследования теплообмена в плотном слое гранулированного материала, приведена на рис. 1.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Устанавливалась заданная температура воздуха на регуляторе, включались вентилятор 1 и нагреватель 2. Расход воздуха регулировался шибером на входе вентилятора. После выхода установки в режим засыпался материал с заданной массой и начинали производиться замеры температуры. Сетка 4 предотвращала попадание гранул в воздуховод. Для измерения скорости

воздуха использовался анемометр 3. Во всех измерениях определялись температуры воздуха на входе $t'_в$ и выходе $t''_в$, температуры материала на входе (вверху установки) $t'_м$ и выходе $t''_м$ (внизу установки), а также температура материала на расстоянии 0,12–0,52 м от уровня засыпки теплообменного участка. Максимальная высота слоя составляла 0,52 м., диаметр канала – 0,1 м. Замеры температур осуществлялись с интервалом времени 30 с. Температура воздуха на входе варьировалась от 50 °С до 80 °С. По полученным результатам определялись основные характеристики теплообмена между воздухом и дисперсной насадкой.

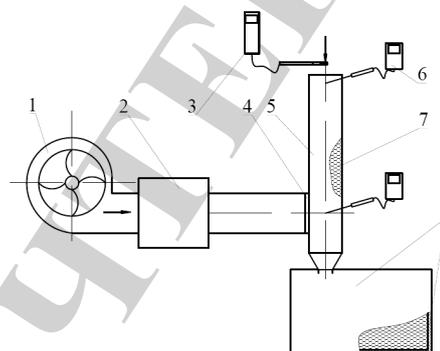


Рис. 1. Установка для экспериментального исследования теплообмена в плотном слое гранулированного материала: 1 – вентилятор; 2 – нагреватель; 3 – анемометр; 4 – сетка; 5 – рабочая камера; 6 – термометр; 7 – гранулированный материал; 8 – емкость сбора дисперсного материала; 9 – изоляция

5. Результаты исследования теплообмена плотного продуваемого слоя гранулированного материала

5. 1. Исследование теплообмена неподвижного плотного слоя гранулированного материала при его нагреве потоком воздуха

Эксперименты, проведенные по приведенной выше методике, показали, что температура материала по высоте существенно различается, что особенно заметно при наступлении стационарного режима, вследствие тепловых потерь в окружающую среду. На рис. 2 представлены зависимости изменения температур теплоносителей (воздух и керамзит) от времени, эти зависимости были типичными для всех опытов. Температура материала на выходе не превышает 71 °С, а интенсивный нагрев материала заканчивается после 600 с при температуре 68 °С. Интенсивность нагрева материала во входном сечении снижается после 240 с работы.

Во всех опытах (рис. 2) интенсивность нагрева материала во входном сечении существенно выше, чем на выходе. Уменьшение массы также приводит к увеличению интенсивности нагрева, как во входном, так и выходном сечении. При $t'_в = 80$ °С темп нагрева в выходном сечении составляет 0,065 К/с, при $t'_в = 60$ °С темп нагрева в выходном сечении составляет 0,044 К/с для массы загрузки $m=2,01$ кг, а при $m=1,7$ кг темп нагрева составляет 0,059 К/с.

При одинаковой массе загрузки (кривые 1, 2) и одинаковой температуре нагрева материала, соответствующей точке перелома кривой 2а ($t=53$ °С), темп нагрева для кривой 1а (рис. 2) составляет 0,83 К/с, а

для кривой 2а (рис. 2) – 0,12 К/с. Это свидетельствует о существенном влиянии температуры греющего теплоносителя (воздух) на интенсивность теплообменных процессов: увеличение входной температуры в 1,3 раза привело к увеличению темпа нагрева в 7 раз. Для участка стабилизации темп нагрева керамзита при $t'_в = 80\text{ }^\circ\text{C}$ выше темпа нагрева при $t'_в = 60\text{ }^\circ\text{C}$ в 1,8 раз.

На рис. 3 представлен ход температурных кривых для воздуха и материала. Средняя скорость фильтрации составляла $w_\phi = 1,2\text{ м/с}$.

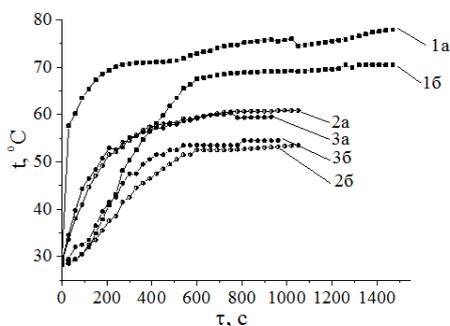


Рис. 2. Изменение температуры керамзита во входном (а) и выходном (б) сечении аппарата: 1 – начальная температура воздуха $t'_в = 80\text{ }^\circ\text{C}$, 2, 3 – начальная температура воздуха $t'_в = 60\text{ }^\circ\text{C}$, 1, 2 – масса загрузки $m=2,01\text{ кг}$; 3 – масса загрузки $m=1,7\text{ кг}$

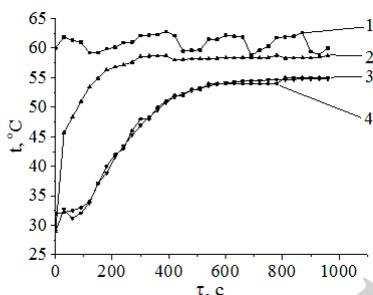


Рис. 3. Температуры материала (керамзит) и воздуха на входе и выходе из аппарата: 1 – температура воздуха на входе, 2 – температура материала на входе, 3 – температура воздуха на выходе, 4 – температура материала на входе (вверху аппарата)

Из рис. 3 видно, что на выходе из рабочего участка температура воздуха практически соответствует температуре материала. Это свидетельствует о полноте поглощения теплоты, передаваемой воздухом. Кривая 2 имеет сглаженный вид в сравнении с кривой 1, т. к. представляет собой результат усреднения данных по температуре для трех повторных экспериментов.

В выходном сечении наиболее явно прослеживаются три участка нагрева. Начальный, непродолжительный, для которого температура изменяется незначительно. Затем наблюдается участок интенсивного нагрева с постоянной скоростью. После него идет участок стабилизации, на котором температура материала практически не изменяется.

Первичные данные экспериментов использовались для расчета теплоты, передаваемой от воздуха к материалу, и оценке коэффициента межкомпонентного теплообмена. В исследуемых условиях для всех случаев после 600 с нагрева поглощение теплоты из нагретого

воздуха существенно снижается, т. е. его тепловой потенциал используется малоэффективно.

На рис. 4 приведен характер зависимости среднего коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_м$ от времени процесса для всех рассматриваемых условий эксперимента.

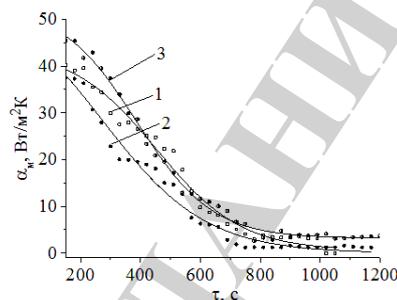


Рис. 4. Изменение среднего коэффициента теплоотдачи во времени: 1, 2 – температура воздуха на входе $t'_в = 60\text{ }^\circ\text{C}$, 3 – температура воздуха на входе $t'_в = 80\text{ }^\circ\text{C}$, 1, 3 – масса загрузки $m=2,01\text{ кг}$; 2 – масса загрузки $m=1,7\text{ кг}$. Средняя скорость фильтрации $w=1,2\text{ м/с}$

В соответствии с законом Ньютона-Рихмана, при расчете $\bar{\alpha}_м$ учитывалась площадь поверхности межкомпонентного теплообмена $F_{пов}$. То есть площадь поверхности всех частиц, находящихся в рабочей камере. $F_{пов}$ может быть определена в соответствии с методикой [14]. Расчет $F_{пов}$ для керамзитовой засыпки привел к получению следующих данных: при высоте слоя $L=0,52\text{ м}$ – $F_{пов}=0,67\text{ м}^2$; при высоте слоя $L=0,39\text{ м}$ – $F_{пов}=0,51\text{ м}^2$. Для гравия при $L=0,52\text{ м}$ – $F_{пов}=0,59\text{ м}^2$; при $L=0,39\text{ м}$ – $F_{пов}=0,44\text{ м}^2$.

Все кривые с высокой точностью описываются уравнениями класса сигмоид:

$$\bar{\alpha}_м = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(\tau-b)/c}} + A_2. \tag{2}$$

Коэффициент A_2 показывает степень приближения к равновесному состоянию. Значение этого коэффициента было выше при $t'_в = 80\text{ }^\circ\text{C}$: $A_2=3,2$. При $t'_в = 60\text{ }^\circ\text{C}$ и той же массе засыпки $m=2,01\text{ кг}$: $A_2=2,2$. Снижение массы до $m=1,67\text{ кг}$ привело к снижению тепловых потерь, соответственно, снижению коэффициента: $A_2=0,6$. Коэффициент A_1 показывает максимально возможное значение коэффициента теплоотдачи. Коэффициенты b и c также определяются эмпирически и учитывают влияние длительности процесса. Так, для $t'_в = 80\text{ }^\circ\text{C}$ (кривая 1): $b=498,3$; $c=101,7$. Для $t'_в = 60\text{ }^\circ\text{C}$ (кривая 2): $b=440,0$; $c=130,9$. Для $t'_в = 60\text{ }^\circ\text{C}$ при меньшей массе (кривая 3): $b=388,0$; $c=125,7$. Снижение коэффициента b свидетельствует о том, что период изменения $\bar{\alpha}_м$ от максимального значения до минимального, который соответствует наступлению стационарного состояния, уменьшается.

5. 2. Исследования теплообмена движущегося плотного слоя гранулированного материала с потоком воздуха

При исследовании теплообмена между предварительно нагретым воздухом и движущимся плотным слоем гранулированного материала средняя скорость фильтрации воздуха составляла 3,5–0,63 м/с – для ке-

рамзита, 0,5–3,5 м/с – для гравия, высота слоя 0,12 м; скорость движения слоя материала: $0,8 \cdot 10^{-3}$ – $4,4 \cdot 10^{-3}$. Температура окружающей среды изменялась в диапазоне (13–20) °С. Характер изменения температуры материала (гравий) в зависимости от скорости фильтрации демонстрирует рис. 5. Увеличение скорости способствует интенсификации теплообмена, причем при скорости $w=1$ м/с материал практически перестал нагреваться через 330–360 с, достигнув значения температуры $t \approx 55$ °С. При меньших скоростях эффективность нагрева была ниже.

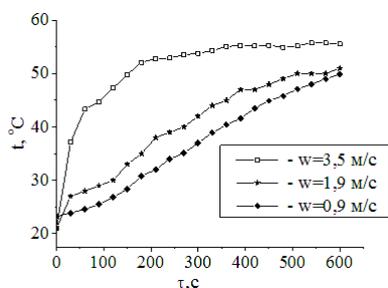


Рис. 5. Нагрев гравия в рабочей камере при различной скорости фильтрации воздуха $w_{\text{ф}}$

На рис. 6 представлены температурные кривые, полученные для слоя керамзита при различной скорости фильтрации воздуха. Влияние скорости при нагреве насадки из керамзита значительно меньше, чем для гравия.

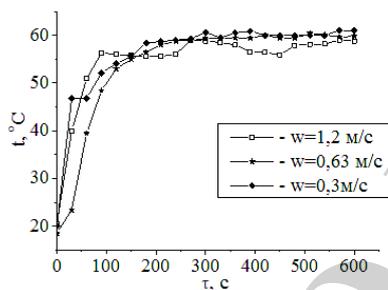


Рис. 6. Нагрев керамзита в рабочей камере при различной скорости фильтрации воздуха $w_{\text{ф}}$

Видно (рис. 6), что, начиная с определенного промежутка времени, устанавливается стационарный режим, при котором температуры материала практически не меняются. Для движущегося слоя этот режим начинается при $\tau=300$ с, для неподвижного – при $\tau=500$ с. Сопоставление данных по кинетике нагрева гравия (рис. 5) и керамзита (рис. 6) показывает, что керамзит нагревается в рабочей камере значительно интенсивнее. В опытах с движущимся слоем время наступления стационарного режима для керамзита сокращается в 2,4 раза (диапазон скоростей воздуха: 0,5–3,5 м/с, средняя скорость движения слоя материала: $0,9 \cdot 10^{-3}$ м/с), для неподвижного – в 2,2 раза. Для того чтобы эффективность теплообмена с гравием была сопоставима с керамзитом, скорость фильтрации воздуха должна быть значительно увеличена [15].

5. 3. Сравнительная характеристика интенсивности теплообмена в неподвижном и движущемся слое

На рис. 7 представлен график зависимости коэффициентов для движущегося (1) и неподвижного (2)

слоя керамзита. При прочих равных условиях коэффициент межкомпонентного теплообмена в движущемся слое сопоставим или выше, чем в неподвижном (рис. 7).

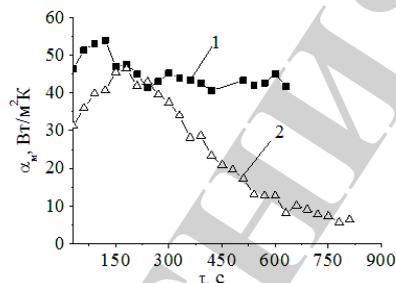


Рис. 7. Изменение среднего коэффициента межкомпонентного теплообмена: 1 – движущийся слой керамзита, 2 – неподвижный слой керамзита

Результаты получены для следующих условий: входная температура воздуха $t'_1 = 80$ °С, средняя скорость фильтрации $\bar{w} = 1,2$ м/с, средняя скорость слоя $\bar{w}_k = 4,4 \cdot 10^{-3}$ м/с. Линия (1) для движущегося слоя на всем протяжении опытов оставалась выше линии (2), что свидетельствует о более высокой интенсивности процесса теплообмена. В среднем увеличение $\bar{\alpha}_m$ по данным рис. 7 увеличивается в на 27 %. Однако снижение скорости слоя до $\bar{w}_k = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м/с привело к получению сопоставимых значений $\bar{\alpha}_m$. При проектировании теплоаккумулятора и для оценки его эффективности в составе теплоутилизатора следует учесть то, что организация движения слоя значительно усложняет его конструкцию. Поэтому окончательный выбор условий теплообмена газового потока со слоем гранулированного материала зависит от непосредственных практических задач и условий его работы.

6. Обсуждение результатов исследования теплообмена между потоком воздуха и плотным слоем гранулированного материала

Исследование теплообмена между газовой (воздушной) движущейся средой с неподвижным слоем показывает, что эффективность работы теплообменного устройства определяется выбором периода нагрева насадки. При массе керамзита $m=2,01$ кг и температуре воздуха на входе $t'_в = 80$ °С после 450 с температурная кривая меняет ход: темп охлаждения воздуха, соответственно, темп нагрева материала, существенно снижается. Располагая данными по коэффициентам теплоотдачи, которые определены экспериментально, можно оценить период нагрева для теплоаккумулятора при произвольной массе загрузки в соответствии с уравнением теплового баланса для периода нагрева:

$$Q_1 = \bar{\alpha}_m \cdot F_{\text{пов}} \cdot (\bar{t}_1 - \bar{t}_{м1}) \cdot \tau_1 = m \cdot c \cdot (t_m^{\tau_1} - t_m^0), \quad (3)$$

где $\bar{t}_1, \bar{t}_{м1}$ – средние за период температуры греющей (воздух) и нагреваемой (гранулированный материал) сред; $\bar{t}_{м1}$ – средняя температура поверхности гранулированного материала за период нагрева, τ_1 – период нагрева, m – масса материала, $(t_m^{\tau_1} - t_m^0)$ – изменение температуры материала в течение периода нагрева. Зависимость (3) позволяет оценить τ_1 – длительность

периода нагрева. Для расчета конечных температур нагреваемого материала и греющего потока можно, в соответствии с данными эксперимента, принять температуру на 10–15 % меньшую температуры газа на входе (для диапазона входных температур $t'_в = 60 \div 80$ °С). Температуры компонентов (греющей и нагреваемой сред) на выходе из рабочего участка асимптотически сближаются, что дает основание с большой степенью точности при проведении инженерных расчетов принимать их равными.

Сопоставление данных по коэффициентам межкомпонентного теплообмена, полученные для движущегося и неподвижного слоя, показывает, что для движущегося слоя интенсивность теплообмена будет соизмеримой либо выше, чем для неподвижного. В отличие от классических представлений [16, 17], согласно которым интенсивность теплообмена намного ниже в движущемся слое, чем в неподвижном, в условиях данных исследований получен противоположный результат. Объяснение этому связано с различиями в характере движения слоев. При интенсивном движении слоя возникает его разрежение, увеличивается порозность. Условий для возникновения разрежения (скорость не превышала 0,44 см/с) не возникало, течение оставалось стержнеподобным.

Еще один важный результат, на который следует обратить внимание – это существенное изменение коэффициента теплоотдачи во времени. Поэтому представлять зависимость для определения $\bar{\alpha}_м$ в виде $Nu = f(Re)$, что распространено при обобщении данных, нерационально. Учет только числа Рейнольдса не приведет к получению достоверных значений. Целесообразно при расчете аппаратов с гранулированным слоем применять экспериментальную зависимость изменения $\bar{\alpha}_м = f(\tau)$, причем, как было получено при анализе опытных данных, эта зависимость с высокой степенью точности описывается сигмоидой.

Практическую значимость исследования составляет обоснование выбора керамзита как оптимального материала для теплоаккумулятора. Применение керамзита способно существенно интенсифицировать теплообмен, причем интенсификация более выражена для движущегося слоя. Как было показано выше, время наступления стационарного режима для движущегося слоя керамзита сокращается в 2,4 раза в сравнении с гравием, для неподвижного – в 2,2 раза. Кроме того, керамзит характеризуется относительно низкой насыпной плотностью ($\rho = 450$ кг/м³) и невысокой стоимостью.

Предложенная методика оценки длительности периода нагрева позволяет установить режим работы теплоутилизатора для предприятий с различными производственными мощностями. Полученные экспериментальные сведения о коэффициенте межкомпонентного теплообмена являются необходимым звеном данной методики.

По сравнению с подобными исследованиями других авторов, получены данные по теплообмену полидисперсных частиц без предварительной обработки, таких как керамзит и гравий. Это позволит прогнози-

ровать интенсивность теплообмена в реальном теплоутилизаторе с удовлетворительной точностью.

Использование полученных результатов ограничено видом материалов: керамзит с эквивалентным диаметром частиц $\bar{d}_э = 0,018$ м, и гравий с эквивалентным диаметром частиц $\bar{d}_э = 0,021$ м, а также область проведения экспериментов: скорость фильтрации 3,5–0,5 м/с, скорость движения слоя материала $0,8 \cdot 10^{-3}$ – $4,4 \cdot 10^{-3}$, температура воздуха на входе 60–80 °С.

К недостаткам работы следует отнести то, что зависимости для расчета межкомпонентного теплообмена не представлены в виде критериальных уравнений. Для получения эмпирических уравнений такого вида следует провести дополнительные эксперименты с более широким диапазоном изменения температур и скоростей компонентов. Также следует провести испытания керамзита и гравия с другим составом фракций, что позволит сделать вывод об оптимальном эквивалентном диаметре частиц.

Для развития данного исследования необходимо перейти к испытаниям на натуральных образцах, для чего требуется совместная работа с действующими предприятиями. Трудности перехода в этом направлении связаны с организацией строительных и пуско-наладочных работ.

7. Выводы

1. Рациональным условием работы теплоаккумулятора на основе аппаратов с плотным неподвижным слоем является ограничение продолжительности периода нагрева конечной температурой, составляющей 80 % от значения температуры газа на входе. Последующий нагрев в аппарате сопровождается снижением темпа нагрева материала, что приводит к уменьшению его эффективности. Увеличение скорости фильтрации воздуха приводит к интенсификации теплообмена. Влияние скорости воздуха при нагреве слоя из керамзита значительно меньше, чем для гравия. Увеличение температуры воздуха на входе в аппарат с 60 °С до 80 °С приводит к увеличению темпа нагрева керамзита на участке стабилизации в 1,8 раз.

2. Интенсивность теплообмена в движущемся слое сопоставима или несколько выше, чем в неподвижном. Как в движущемся, так и в неподвижном слое, керамзит нагревается интенсивнее гравия, что связано с различными физическими свойствами. Для движущегося слоя керамзита время наступления стационарного режима сокращается в среднем в 2,4 раза по сравнению с гравием (диапазон скоростей воздуха: 0,5–3,5 м/с, средняя скорость движения слоя материала: $0,9 \cdot 10^{-3}$ м/с), для неподвижного – в 2,2 раза.

3. Коэффициент межкомпонентного теплообмена между потоком воздуха и плотным слоем гранулированного материала увеличивается при увеличении скорости движения газового потока. При нагреве плотного неподвижного слоя материала газовой (воздушной) средой коэффициент межкомпонентного теплообмена монотонно снижается, причем вид кривой описывается функцией класса сигмоид.

Литература

1. Kilkovský, B. Preliminary Design and Analysis of Regenerative Heat Exchanger [Text] / B. Kilkovský, Z. Jegla // Chemical engineering transactions. – 2016. – Vol. 52. – P. 655–660.

2. Sit, M. L. Energy Supply System for Industrial Poultry Houses [Text] / M. L. Sit, A. A. Juravliov, A. V. Doroshenko, V. A. Goncharenko // Problemele energeticii regionale. – 2016. – Vol. 1, Issue 30. – P. 89–100.
3. Васильев, В. А. Экспериментальное исследование регенеративного теплообменника и анализ тепловых процессов [Текст] / В. А. Васильев, К. К. Каменецкий // Холодильная техника и кондиционирование. – 2010. – Т. 2. – С. 22–33.
4. Ding, Y. Hydrodynamics and heat transfer of gas–solid two-phase mixtures flowing through packed beds – a review [Text] / Y. Ding, Y. He, N. T. Cong, W. Yang, H. Chen // Progress in Natural Science. – 2008. – Vol. 18, Issue 10. – P. 1185–1196. doi: 10.1016/j.pnsc.2008.03.023
5. Chandratilleke, T. T. Thermal performance and optimisation of a granular-bed heat recuperator [Text] / T. T. Chandratilleke, N. Nadim, K. Batsioudis // Material of 12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. – 2016. – P. 183–187.
6. Wolkowycy, G. Experimental Results on the Fixed Matrix Regenerator Effectiveness for a Glass Stove Furnace [Text] / G. Wolkowycy // Heat Transfer Engineering. – 2015. – Vol. 37, Issue 6. – P. 591–602. doi: 10.1080/01457632.2015.1060780
7. Snider, D. M. Three fundamental granular flow experiments and CPFD predictions [Text] / D. M. Snider // Powder Technology. – 2007. – Vol. 176, Issue 1. – P. 36–46. doi: 10.1016/j.powtec.2007.01.032
8. Медведев, В. Б. Ячеечная модель поперечно-поточного теплообмена между сыпучим материалом и газом [Текст] / В. Б. Медведев, В. Е. Мизонов, Н. Н. Елин, В. И. Субботин // Химия и хим. технология. – 2008. – Т. 53, № 5. – С. 135–137.
9. Солодкая, А. В. Математическое описание процесса теплообмена между потоками газа и дисперсного материала [Текст] / А. В. Солодкая, И. Л. Бошкова // Журн. Холодильная техника и технология. – 2017. – Т. 53, № 2. – С. 39–43.
10. Cardona, A. Numerical simulation of packed bed heat regenerators [Text] / A. Cardona, M. Storti, C. Zuppa // Mecánica Computacional, Argentina. – 2008. – Vol. 27. – P. 1601–1618.
11. Adeyanju, A. A. Theoretical and Experimental Investigation of Heat Transfer in Packed Beds [Text] / A. A. Adeyanju, K. Manohar // Research Journal of Applied Sciences. – 2009. – Vol. 4, Issue 5. – P. 166–177.
12. Ефимов, А. В. Выбор критериальных уравнений для расчета теплообмена в конденсационных теплообменных аппаратах с промежуточным шарообразным теплоносителем [Текст] / А. В. Ефимов, Л. В. Гончаренко, К. Э. Цымбал, Т. А. Есипенко // Вестник НТУ «ХПИ». – 2003. – № 3. – С. 24–31.
13. Ганжа, В. Л. Основы эффективного использования энергоресурсов. Теория и практика энергосбережения [Текст] / В. Л. Ганжа. – Минск: Белорусская наука, 2007. – 451 с.
14. Arvaniti, E. C. Determination of particle size, surface area, and shape of supplementary cementitious materials by different techniques [Text] / E. C. Arvaniti, M. C. G. Juenger, S. A. Bernal, J. Duchesne, L. Courard, S. Leroy et. al. // Materials and Structures. – 2014. – Vol. 48, Issue 11. – P. 3687–3701. doi: 10.1617/s11527-014-0431-3
15. Boshkova, I. L. Investigation of heat exchange efficiency in the heat exchanger waste heat recovery with granular nozzle [Text] / I. L. Boshkova, A. V. Solodkaya // Material of 3rd International Conference Energy of Moldova – 2016: Regional Aspects of Development. – Chishinau, 2016. – P. 373–377.
16. Горбис, З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков [Текст] / З. Р. Горбис. – М.: Энергия, 1970. – 424 с.
17. Duran, J. Sands, Powders, and Grains: An Introduction to the Physics of Granular Materials [Text] / J. Duran, P. G. Gennes, A. Reisinger; Softcover reprint of the original 1st ed. – New York: Springer-Verlag, 2012. – 214 p.