

**СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І
АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ.
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ
В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ**

10. Шумскайте, М. Й. Анализ влияния объемного содержания и типа глинистых минералов на релаксационные характеристики песчано-алевритовых образцов керна [Текст] / М. Й. Шумскайте, В. Н. Глинских // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – 2015. – № 7. – С. 35-38.

References

1. Shashkov, A. G., Bubnov, V. A., Janovskij, S. Ju. (2004). Volnovye javlenija teploprovodnosti. Moscow: Jeditorial UPSS, 296.
2. Riman, B. (1948). Sochinenija. Per. s nem. pod red., s predisloviem, obzornoj stat'ej i primechanijami V. L. Goncharova. Moscow–Leningrad: Gostehizdat, 543.
3. Lykov, A. V. (2004). Teorija teploprovodnosti. Moscow: Vysshaja shkola, 559.
4. Kartashov, Je. M. (2008). Kraevye zadachi dlja giperbolicheskikh modelej perenosa. Matematicheskie metody i informacionnye tehnologii v himii i himicheskoi tehnologii. Vestn. MITHT, 3 (3), 20–22.
5. Isaev, K. B. (2004). K voprosu ob uchte konechnoj skorosti rasprostraneniya tepla v tverdom tele. Trydi. V Minskogo mezhd. foruma MMF-2004. Minsk: ITMO NANB, 1–6.
6. Luo, Zh. Chen, Sh. Jin, J. (2016). A reduced-order extrapolation central difference scheme based on POD for two-dimensional fourth-order hyperbolic equations. Applied Mathematics and Computation, 289, 396–408.
7. Shen, W., Leigh Little, L. Hu. (2010). Anti-diffusive methods for hyperbolic heat transfer. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 199 (17–20), 1231–1239.
8. Ordonez-Miranda, J., Alvarado-Gil, J. J. (2012). Determination of thermal properties for hyperbolic heat transport using a frequency-modulated excitation source. International Journal of Engineering Science. 50 (1), 101–112.
9. Kudinov, V. A., Kudinov, I. V. (2010). Ob odnom metode poluchenija tochnogo analiticheskogo reshenija giperbolicheskogo uravnenija teploprovodnosti na osnove ispol'zovanija ortogonal'nyh metodov. Vestnik Samarskogo Tehnicheskogo un-ta. Serija: Fiziko-matematicheskie nauki, 5 (21), 159–169.
10. Shumskajte, M. J., Glinskih, V. N. (2015). Analiz vlijaniya obemnogo sodержaniya i tipa glinistyh mineralov na relaksacionnye harakteristiki peschano-alevritovyh obrazcov kerna. Geologija, geofizika i razrabotka nefityanh mestorozhdenij, 7, 35–38.

УДК 536.24

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ТЕПЛООБМЕННИКЕ
С ГРАНУЛИРОВАННОЙ НАСАДКОЙ
STUDY OF HEAT TRANSFER PROCESSES EXCHANGER GRANULAR
NOZZLE INCLUDED**

Солодка А. В., аспирант

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

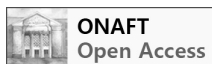
Solodkaya A. V.

Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

Copyright © 2016 by author and the journal “Scientific Works”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Исследуется эффективность работы теплоутилизатора с гранулированной насадкой. Обоснован выбор для исследования частиц гравия и керамзита в качестве материала насадки. Представлены результаты экспериментального изучения межкомпонентного теплообмена в плотном слое дисперсного (гранулированного) материала, движущегося и неподвижного. В схеме экспериментальной установки нагретый воздух моделирует поток отходящих газов в системе вентиляции промышленных предприятий с низкпотенциальными тепловыми выбросами. Исследуется эффективность работы теплообменного участка по схеме противотока в сравнении с продувкой неподвижного слоя. Предложено критериальное уравнение для определения коэффициента межкомпонентного теплообмена, которое учитывает скорость движения теплоносителей, теплофизические свойства газового компонента, определяющий размер частиц. Результаты анализа экспериментальных

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ

данных свидетельствуют, что коэффициенты межкомпонентного теплообмена для движущегося слоя на участке тепловой стабилизации значительно превышает значения для неподвижного слоя частиц, что учитывается представленной обобщающей зависимостью. Установлено, что в качестве материала для гранулированной насадки целесообразно использовать керамзит.

The article concentrates on are investigated the efficiency of the heat exchanger with a granular nozzle. Explained the choice for the study of gravel and expanded clay particles as packing material. Presents the results of the experimental study of heat transfer in the dense intercomponent layer of particulate (granular) material, moving and stationary. In the scheme of the experimental setup heat air simulates the flow exhaust gases in ventilation systems of industrial enterprises with low potential thermal emissions. Investigated the efficiency portion of the heat exchange in counterflow scheme in comparison with flushing of the fiction layer. The article proposes criteria equation to determine the coefficient of heat transfer intercomponent, which takes into account the velocity of heat coolants, thermal properties of the gas component, which determines particle size. The results of the analysis of experimental data show that coefficients of intercomponent heat transfer for the moving layer in the thermal stabilization area is much higher than the values for stationary layer of particles that takes into account by generalizing dependence. It is established that as a granular material for the nozzle is reasonable to use keramzit

Ключевые слова: экспериментальное исследование, теплоутилизатор, межкомпонентный теплообмен, энергетическая эффективность.

Key words: experimental investigation, heat exchanger, heat transfer Interconnects, energy efficiency.

Введение. Использование дисперсных теплоносителей в теплообменниках позволяет интенсифицировать процессы тепло— и массообмена вследствие возможности создания развитой поверхности нагрева в виде непрерывно движущихся либо неподвижных специально выбираемых частиц. Благодаря таким особым свойствам дисперсных теплоносителей осуществляются попытки их использования в теплоутилизаторах, что способно существенно повысить энергоэффективность ряда промышленных производств, непосредственно связанных с термообработкой, при проведении которой потери теплоты могут достигать 40...50 % от подводимой мощности [1, 2]. Общий потенциал вторичных энергоресурсов (ВЭР) для химической, пищевой и строительной промышленности оценивается в несколько миллионов тонн условного топлива [3, 4].

Теплоутилизаторы в виде регенераторов с дисперсной насадкой давно привлекают внимание исследователей [5—7], однако сложность и недостаточная изученность межфазных процессов теплообмена в слое дисперсного материала не позволяет разработать методику инженерного расчета, что препятствует их широкому распространению.

Целью работы являлось экспериментальное исследование процессов теплообмена между нагретым воздухом и плотным слоем гранулированного материала, движущегося и неподвижного, и определение оптимальных режимных параметров теплоутилизатора для предприятий с низкопотенциальными выбросами теплоты, такими как пищевые производства.

Выбор гранулированных материалов для низкопотенциального теплоутилизатора. В зависимости от поставленной задачи, в технике широко используются различные дисперсные системы, отличающиеся видом материала и размером частиц. Дисперсными называют системы «газ—твердые частицы», «жидкость—твердые частицы». Их важнейшей характеристикой является объемная концентрация частиц β , представляющая собой отношение объемов частиц ко всей системе. В зависимости от объемной концентрации, дисперсные системы разделяют на следующие классы [6]: слабозапыленный поток — $0 < \beta \leq 4 \cdot 10^{-4}$; газозвесь — $4 \cdot 10^{-4} \leq \beta \leq 2 \cdot 10^{-2}$; флюидный поток — $2 \cdot 10^{-2} \leq \beta \leq 3,5 \cdot 10^{-2}$; падающий слой, псевдожизненный (кипящий) слой — $3,5 \cdot 10^{-2} \leq \beta \leq 5 \cdot 10^{-1}$; плотный слой движущийся, неподвижный — $5 \cdot 10^{-1} \leq \beta \leq 7,4 \cdot 10^{-1}$.

В рамках данной работы рассматриваются системы, относящиеся к последнему классу, причем сами частицы представляют собой сухие сыпучие вещества, что позволяет определять их как гранулированные материалы. Целесообразность такого термина определяется также тем, что распространенное представление о дисперсных системах — это коллоидные растворы и золи, что не имеет отношения к предмету данной работы.

При выборе материала для промежуточного теплоносителя (гранулированной насадки) руководствуются требованиями [6], и имеющими непосредственное отношение к задачам данного исследования:

- достаточная механическая прочность, способность противостоять ударным нагрузкам;
- достаточно высокая износостойкость, позволяющая свести к минимуму истирание зерен при их контакте между собой;
- высокая термостойкость, т. е. способность длительно противостоять периодическим сменам режимов нагрева и охлаждения;

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ

- химическая инертность по отношению к продуваемому газу и конструкционным материалам;
- незначительная способность выделять и абсорбировать различные газы;
- высокая теплопроводность, что позволяет свести к минимуму внутреннее термическое сопротивление;
- высокая теплоемкость, что позволяет уменьшить массовый расход теплоносителя при заданной тепловой нагрузке и разности температур;
- сравнительно невысокие удельная и насыпная плотность, что способствует облегчению конструкции;
- низкая стоимость материала.

В диапазоне от 700 до 2600 кг/м³ и от 750 до 1000 Дж/(кг·С) попадают такие материалы: алюминий, гравий, керамзит, песок, полихлорвинил, стеклопластик, корунд, силикагель. На основании анализа характеристик существующих гранулированных материалов, предлагаемых к использованию, были выбраны для дальнейших исследований гравий и керамзит, размер частиц: 10...20 мм. В табл. 1 приведены основные физические свойства этих материалов, на основании которых проводились тепловые расчеты.

Таблица 1 — Основные физические свойства исследуемых гранулированных материалов [9]

Материал	Теплоёмкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Плотность, кг/м ³
Гравий	750...1000	0,4...0,93	2022
Керамзит	840	0,14...0,099	662

Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента. Для проведения исследований была сконструирована установка, рабочая часть которой моделирует участок нагрева теплообменного аппарата с дисперсной насадкой. Конструктивные особенности подобных аппаратов, рассчитанные на утилизацию теплоты отходящих газов промышленных предприятий, связываются с использованием движущегося или неподвижного слоя, что учитывалось методиками проведения исследований. Экспериментальные исследования проведены на установке, представленной на рис. 1.

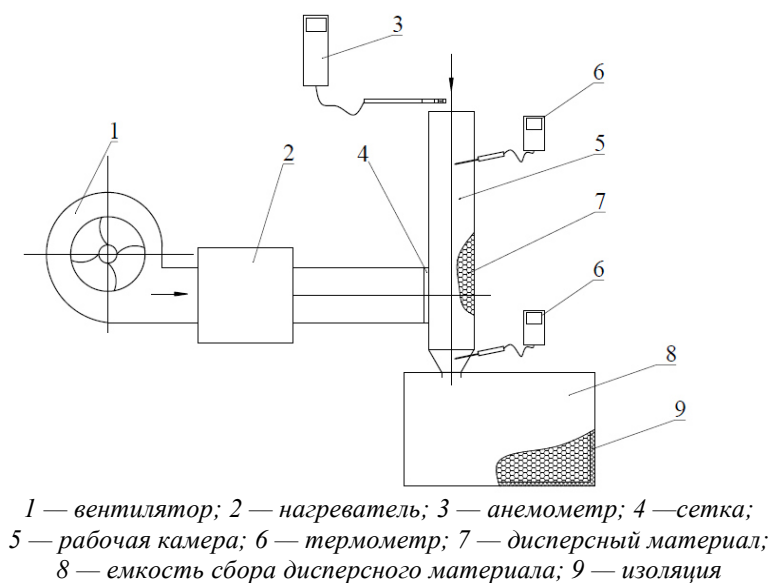


Рис. 1 — Установка для экспериментального исследования теплообмена в плотном слое гранулированного материала

движущегося слоя — противоток.

На рис. 2 представлены результаты измерения температур керамзита для движущегося (рис. 2 а) и неподвижного (рис. 2 б) слоя на входе в рабочую камеру и воздуха — на выходе из нее. Сплошной линией указана температура воздуха на входе. Скорость движения слоя материала: $W_m = 0,00067$ м/с, средняя скорость движения воздуха: $W_b = 0,85$ м/с. Высота засыпки — $L = 0,52$ м.

Видно, 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 (на графике отмечены пунктирной линией). Можно сделать вывод, что интенсивность теплообмена выше для движущегося слоя. Следует отметить существующее различие в раз-

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. В рабочую камеру 5 загружался гранулированный материал. Включался вентилятор 1 и нагреватель 2, после которого нагретый воздух поступал в рабочую камеру. Температура воздуха контролировалась на входе и скорость потока, температура воздуха и материала на выходе, (датчики 3 и 6). Эксперимент проводился с трехкратным повторением. Средняя скорость фильтрации воздуха составляла $w = 0,5...2$ м/с, диаметр воздуховода $d = 0,1$ м.

При исследовании процессов теплообмена с движущимся слоем методика практически совпадала с описанной выше, при этом на выходе утаивалось выпускное устройство, регулирующее скорость движения частиц.

Результаты и обсуждение. Схема движения теплоносителей при исследо-

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

ности температур между температурой материала и воздуха в одном сечении для движущегося и неподвижного слоя. При $\tau = 800$ с разность температур воздуха и материала составляет $\Delta t = 50 - 43 = 7$ °С, а для движущегося слоя $\Delta t = 60 - 55,7 = 4,3$ °С. Это связано с потерями в окружающую среду: при экспериментах с неподвижным слоем температура окружающей среды составляла 10 °С, с движущимся — 19 °С. В процессе работы температура воздуха на выходе повышается, т.е. эффективность теплообмена снижается, что для практического применения является нежелательным явлением, которое следует учитывать при выборе рабочих параметров теплоутилизатора.

На рис. 3 представлены результаты экспериментов по нагреву гравия в движущемся (рис. 3 а) и неподвижном (рис. 3 б) слое.

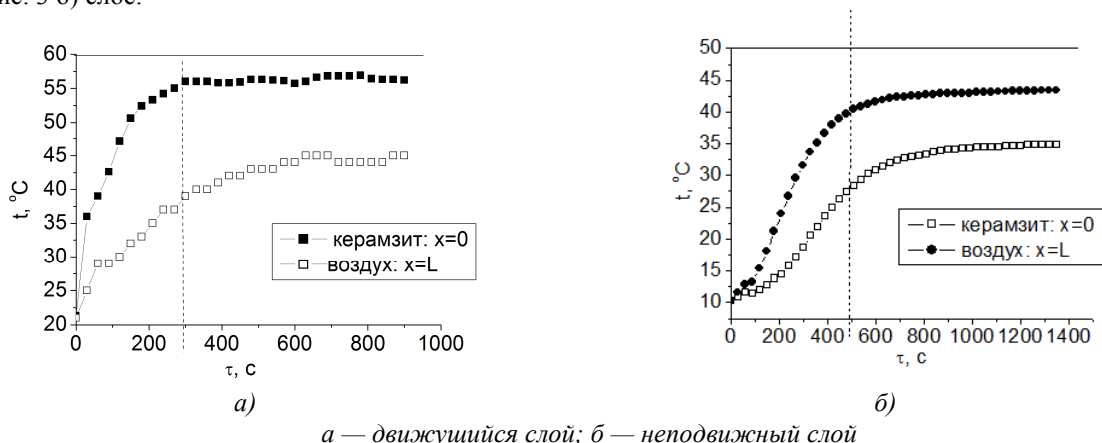


Рис. 2 — Изменение температуры воздуха и гравия во времени

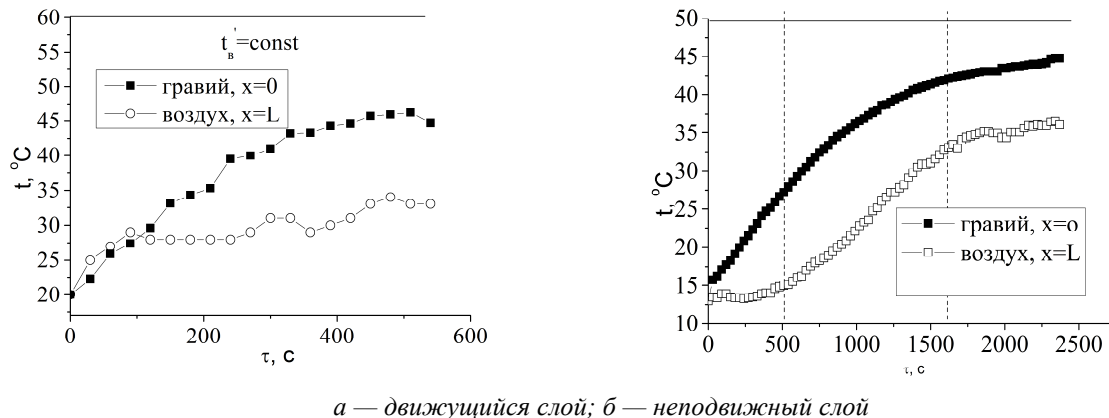


Рис. 3 — Изменение температуры воздуха и гравия во времени

В отличие от опытов с керамзитом (рис. 2), участок тепловой стабилизации не наблюдался, что свидетельствует о более продолжительном во времени участке нестационарного теплообмена.

На рис. 4 представлены температурные кривые для сравнительного анализа интенсивности нагрева гравия и керамзита в движущемся (рис. 4 а) неподвижном (рис. 4 б) слое.

Видно, что, как в движущемся, так и в неподвижном слое керамзит нагревался интенсивнее гравия.

Оценка энергетической эффективности процесса теплообмена проводилась на основании тепловых расчетов по методикам [8] и известным зависимостям для расчета тепловых потерь и определения теплофизических характеристик [9].

Важнейшей характеристикой эффективности теплопереноса в системе «газ—твердые частицы» является коэффициент межкомпонентного теплообмена α_m . Его определяют по эмпирическим критериальным уравнениям, которое в общем виде учитывает влияние ряда комплексов, таких как число Рейнольдса, $Re = \frac{w_\phi d_\phi}{\nu_\phi}$,

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ

эквивалентное число Рейнольдса $Re_3 = \frac{4w_\phi}{a_{y0}v_z}$, (где w_ϕ — скорость фильтрации, a_{y0} — удельная площадь поверхности частиц, d_3 — эквивалентный диаметр частиц, v_z — вязкость газа), и симплексов, число Фруда $Fr = \frac{w_\phi^2}{g \cdot L}$, (где L — характерный размер области, в которой рассматривается течение, в данном случае — высота канала), поправки Михеева $\varepsilon_t = \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}} \right)^{0,25}$ и симплексов L/d_3 , L/D , w_m/w_ϕ (w_m — скорость движения твердых частиц).

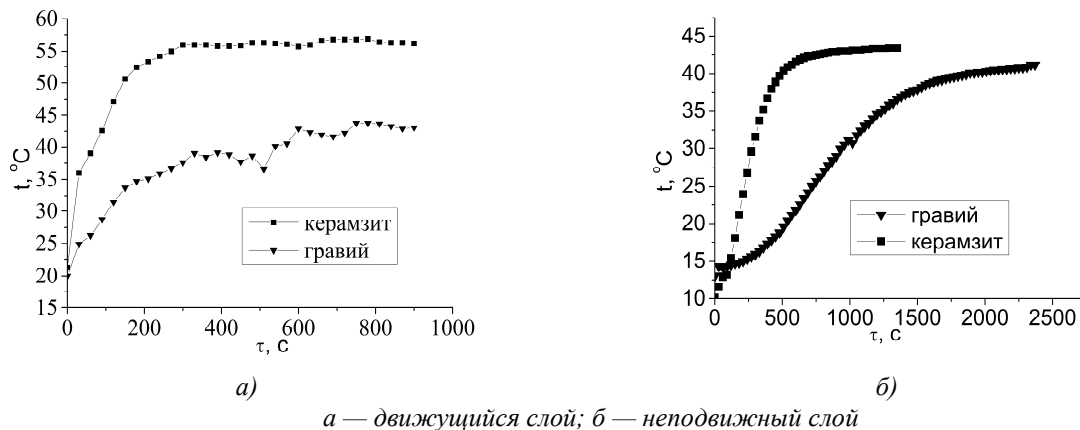


Рис. 4 — Изменение температуры керамзита и гравия во времени

Для рассматриваемой задачи вид критериального уравнения упрощается, поскольку размеры частиц значительно меньше определяющих размеров рабочей камеры, а высота рабочей камеры существенно выше ее диаметра ($L > D$). Кроме того, поправка Михеева может быть принята равной единице, поскольку теплоносителем является газ (воздух): $\varepsilon_t \cong 1$.

Обобщив экспериментальные данные, была получена зависимость для расчета коэффициента межкомпонентного теплообмена между газовой средой (нагретый воздух) и твердыми частицами, движущимися и неподвижными:

$$Nu_m = 0,074 \cdot Re^{0,52} \cdot \left(1 + (w_m \cdot 10^3) / w_\phi \right)^{1,21} \quad (1)$$

где $Nu_m = \frac{\alpha_m d_3}{\lambda_z}$ — число Нуссельта для межкомпонентного теплообмена.

Зависимость описывает экспериментальные данные с относительной погрешностью 17 % и применима для области стабилизированного теплообмена между газом и твердым материалом для движущегося и неподвижного плотного слоя частиц, фильтрации находится в пределах $w_\phi = 0,5 \dots 2$ м/с, характерный размер частиц $d_3 = 10 \dots 20$ мм, скорость движения слоя $w_m = 0,006 \dots 0,008$ м/с, температура воздуха на входе в рабочий участок $t'_g = 50 \dots 60$ °С.

Выводы. При конструировании теплоутилизаторов для низкпотенциальных источников теплоты рационально использовать в качестве материала для дисперсной насадки керамзит, который отличается сравнительно низкой удельной массой, низкой стоимостью и характеризуется высокой теплопоглощающей способностью.

Коэффициент межкомпонентного теплообмена движущегося слоя гранулированного материала выше, в сравнении с неподвижным слоем. Для оценки эффективности межкомпонентного теплообмена рекомендуется обобщающая зависимость, которая позволяет рассмотреть вклад различных определяющих режимных параметров.

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ

Литература

1. Курчев, А. О. Моделирование тепловых процессов в регенеративных утилизаторах теплоты с фазовыми переходами в насадке [Текст]: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» / А. О. Курчев. – Иваново, 2010. – 19 с.
2. Ковалёв, А. В. Эффективность утилизации теплоты и экономия топлива в хлебопекарных печах [Текст] / А. В. Ковалёв, В. А. Анистратенко, В. Ю. Осауленко // Хлебопечение России. – 2003. – № 5. – С. 8 – 40.
3. Комаров, В. И. Проблемы использования вторичных сырьевых ресурсов отраслей пищевой и перерабатывающей промышленности и их влияние на окружающую среду [Текст] / В. И. Комаров, Е. И. Лебедев, Т. А. Мануйлова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 1998. – № 2. – С. 6–10.
4. Медведев, В. Б. Моделирование и расчет тепловых процессов в регенеративных утилизаторах теплоты с циркулирующей гранулированной насадкой [Текст]: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» / В. Б. Медведев. – Иваново, 2009. – 17 с.
5. Горбис, З. Р. Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями [Текст] / З. Р. Горбис, В. А. Календерьян. – М.: Энергия, 1975. – 296 с.
6. Фалеев, В. В. Исследование межфазного теплообмена в регенеративном теплообменнике с дисперсной насадкой [Текст] / В. В. Фалеев, А. В. Бараков // Промышленная энергетика. – 2003. – № 6. – С. 35–37.
7. Прутских, Д. А. Гидродинамика и теплообмен в регенераторе с дисперсной насадкой [Текст]: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика». – Воронеж, 2009. – 22 с.
8. Календерьян, В. А. Тепломассоперенос в аппаратах с плотным дисперсным слоем [Текст] / В. А. Календерьян, И. Л. Бошкова // Монография. – К.: Слово, 2011. – 184 с.
9. Исаченко, В. П. Теплопередача [Текст] / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

References

1. Kurchev, A.O. (2010). Modelirovanie teplovykh protsessov v regenerativnykh utilizatorah teploty s fazovymi perehodami v nasadke. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. Ivanovo, Ivanovskij gosudarstvennyj arhitekturo-stroitel'nyj universitet, 19.
2. Kovalev, A. V., Anistratenko, V. A., Osaulenko, V. Yu. (2003). Effektivnost utilizatsii teploty i ekonomiya topliva v hlebopekarnykh pechakh. Hlebopechenie Rossii, 5, 8 – 40.
3. Komarov, V. I., Lebedev, E. I., Manuylova, T. A. (1998). Problemy ispolzovaniya vtorichnykh syrevykh resursov otrasley pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti i ih vliyanie na okruzhayushchuyu sredu. Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya, 2, 6-10.
4. Medvedev, V. B. (2009). Modelirovanie i raschet teplovykh protsessov v regenerativnykh utilizatorah teploty s tsirkuliruyushchey granulirovannoy nasadkoy. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. Ivanovo, Ivanovskij gosudarstvennyj jenergeticheskij universitet, 17.
5. Gorbis, Z. R., Kalenderyan, V. A. (1975). Teploobmenniki s protochnymi dispersnymi teplonositelyami. Moscow: Energiya, 296.
6. Faleev, V. V., Barakov, A. V. (2003). Issledovanie mezhfaznogo teploobmena v regenerativnom teploobmennike s dispersnoy nasadkoy. Promyshlennaya energetika, 6, 35–37.
7. Prutskih, D. A. (2009). Gidrodinamika i teploobmen v regeneratore s dispersnoy nasadkoy. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. Voronezh, Voronezhskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet, 22.
8. Kalenderyan, V. A., Boshkova I. L. (2011). Teplomassoperenos v apparatah s plotnym dispersnym sloem. Kiev: Slovo, 184.
9. Isachenko, V. P., Osipova, V. A., Sukomel, A. S. (1981). Teploperedacha. – Moscow: Energoizdat, 416.