

УДК 536.24:66.045.132

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.01

## МЕТОДИКА ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА С НЕПОДВИЖНЫМ ПЛОТНЫМ СЛОЕМ ГРАНУЛИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА

**И. Л. БОШКОВА<sup>1\*</sup>, Н. В. ВОЛГУШЕВА<sup>1</sup>, А.И. СОЛОДКАЯ<sup>1</sup>, Л.З. БОШКОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> кафедра теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей, Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, УКРАИНА

<sup>2</sup> кафедра термодинамики и возобновляемой энергетики, Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, УКРАИНА

\*e-mail: boshkova.irina@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** Рассматривается возможность использования низкопотенциальных тепловых вторичных энергоресурсов в виде отходящих газов от промышленных предприятий незначительной энергетической мощности, в частности, пищевых. Анализируются теплоутилизаторы с неподвижным плотным слоем гранулированных материалов, обеспечивающие непосредственный теплообмен газа (воздуха) с частицами. Указывается на недостаточное количество эффективных разработок теплоутилизаторов низкопотенциальной теплоты и сведений по рациональным тепловым режимам их работы. Отмечается эффективность применения гранулированных материалов в теплоэнергетике с позиции интенсификации процессов переноса теплоты и массы. Описана методика теплового расчета контактного теплоутилизатора для определения его геометрических характеристик и основных параметров процесса. Предлагаемая методика учитывает изменение коэффициента межкомпонентного теплообмена во времени. Приведены результаты расчетов основных характеристик теплоутилизатора промышленного назначения с неподвижной насадкой. В теплоутилизаторе с неподвижной насадкой не возникает необходимости в организации движения слоя гранулированного материала, что существенно упрощает эксплуатацию и конструкцию теплообменника. Представлены результаты расчета теплоутилизатора с неподвижным слоем, предназначенного для обогрева помещения, расположенного непосредственно рядом с вентиляционными каналами предприятия. В предлагаемом теплоутилизаторе в периоде нагрева передача теплоты осуществляется при непосредственном контакте газового потока с частицами материала, а в периоде охлаждения теплота передается от наружной поверхности теплоутилизатора в окружающую среду. Для получения сглаженной характеристики нагрева помещения целесообразно дублировать наполненные гранулированным материалом рабочие каналы теплоутилизатора и включать их поочередно. Рассчитанный теплоутилизатор отличается сравнительно высоким значением коэффициента полезного действия и возможностью работы без прямого контакта частиц насадки с воздухом обогреваемого помещения. Рассчитанные на низкопотенциальную теплоту конструкции теплоутилизаторов предлагаются для использования на предприятиях пищевых производств.

**Ключевые слова:** утилизация; низкопотенциальная теплота; эффективность; коэффициент межкомпонентного теплообмена; неподвижный слой; керамзит

## METHOD OF THERMAL CALCULATION OF A HEAT EXCHANGER WITH A FIXED DENSE LAYER OF GRANULATED MATERIAL

**I. BOSHKOVA<sup>1\*</sup>, N. VOLGUSHEVA<sup>1</sup>, A. SOLODKAYA<sup>1</sup>, L. BOSHKOV<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Department of Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transportation, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Thermodynamics and Renewable Energy, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, UKRAINE

**ABSTRACT** The aim of the work is to develop a methodology for calculating the heat exchanger for the utilization of low-potential heat fluxes from industrial enterprises and its approbation. Methods of solution included the analysis of existing heat recovery devices, the identification of existing problems of creating efficient heat exchangers and the creation of an algorithm for calculating heat exchangers with a dense layer of granulated material. The possibility of using low-potential thermal secondary energy resources in the form of exhaust gases from industrial enterprises of low energy capacity, in particular, food, is considered. Heat exchangers with a fixed dense layer of granular materials are analyzed, providing direct heat exchange of gas (air) with particles. There is a shortage of developed efficient heat exchangers for low-potential heat fluxes and information on rational thermal modes of their operation. The effectiveness of the use of granular materials in heat and power engineering is noted from the standpoint of intensifying the processes of heat and mass transfer is shown. The method of thermal calculation of the contact heat exchanger to determine its geometric characteristics and the main process parameters is described. The proposed method takes into account the change in the coefficient of intercomponent heat transfer over time. The results of calculations of the main characteristics of an industrial heat exchanger with fixed filler are presented. In the regenerator with fixed filler there is no need to organize the movement of a layer of granular material, which greatly simplifies the operation and design of the heat exchanger. The results of the calculation of a fixed bed heat exchanger designed for space heating, located directly next to the ventilation channels of the enterprise, are presented. In the proposed heat exchanger in the heating period, the heat is transferred by direct contact of the gas flow with the material particles, and in the cooling period the heat is transferred from the outer surface of the heat exchanger to the environment. To obtain a smoothed heating characteristic of the room, it is advisable to duplicate the working channels of the heat

*utilizer filled with granular material and turn them on alternately. The calculated heat exchangers are characterized by a relatively high efficiency and the ability to work without direct contact of the particles with the air of the heated room. Designed for low-potential heat flux of regenerator designs are offered for use in food production plants.*

**Keywords:** utilization; low-potential heat; efficiency; inter-component heat transfer coefficient; fixed bed; expanded clay

## Введение

Актуальность работы определяется целесообразностью использования вторичных энергоресурсов (ВЭР) в виде теплоты отходящих газов. Энергетический потенциал ВЭР реализуется в утилизационных установках и системах, к которым относятся котлы-утилизаторы, теплообменники, печи, газотурбины, системы оборотного водоснабжения для снижения расхода технологической воды, тепловые насосы и т. д. [1-3]. В перечень мероприятий по энергосбережению, имеющих приоритетное значение, включено повышение уровня использования ВЭР [4]. Теплота промышленных выбросов даже в Европейских странах достигает 30%, что требует пристального внимания и анализа возможности ее утилизации [5]. Общегодовой выход ВЭР в Украине оценивается величиной 26,18 млн. т. у.т. по данным 2010 г. [6], однако для привлечения его в энергетический баланс необходимы значительные капитальные вложения, связанные с внедрением энергосберегающего оборудования и технологий [7].

Высокий энергетический потенциал имеют отходящие дымовые газы, при его использовании на 50% возможно получение дополнительной тепловой энергии в количестве около 0,7 млн. Гкал в год. В данной работе внимание сосредоточено на потенциале тепловых ВЭР, относящихся по имеющейся классификации к низкопотенциальным по степени концентрации энергии [8], которые также включают теплоту отходящих газов от промышленных предприятий незначительной энергетической мощности, в частности, пищевых. К способам использования низкопотенциальных ВЭР на предприятиях относят предварительный подогрев воздуха в системах вентиляции, воды для горячего водоснабжения и автономных систем отопления, подогрева воздуха в помещениях различного назначения. Для решения вопроса утилизации низкопотенциальной теплоты особый интерес представляют теплоутилизационные установки, обеспечивающие непосредственный теплообмен газа (воздуха) с частицами, о чем свидетельствуют работы [9-11] и ряда других авторов. Рекуперативные теплообменники с плотным слоем дисперсных (гранулированных) материалов характеризуются высокой тепловой эффективностью, компактностью, небольшой массой, простотой конструкции, надежностью [12-14]. Использование гранулированных материалов в теплоэнергетике позволяет интенсифицировать процессы тепло- и массообмена [15-17]. Однако целесообразность утилизации низкопотенциальной теплоты не всегда оправдана, что связано, в основном, с недостатком разработанных эффективных теплоутилизаторов и

сведений по рациональным тепловым режимам работы. Факторами, усложняющими использование ВЭР, также являются изменчивость их в качестве источника энергии и расхождение режимов работы установок, производящих ВЭР, с режимами спроса на тепловую энергию. В связи с этим в схемах использования ВЭР должны найти широкое применение аккумуляторы теплоты. В этом отношении применение теплоутилизаторов с неподвижным плотным слоем гранулированных материалов представляется перспективным, однако имеющиеся сложности проведения инженерных расчетов подобных аппаратов сдерживают предложения по их использованию в производствах, поскольку их тепловые мощности и рабочие параметры существенно отличаются. Разработка методики теплового конструкторского расчета способствует решению этого вопроса, ее использование позволит определить основные теплофизические параметры процесса и геометрические характеристики теплоутилизатора.

## Цель работы

Целью работы является разработка методики расчета теплообменника для утилизации низкопотенциальных тепловых потоков от промышленных предприятий.

## Изложение основного материала

Регенеративные теплообменники с неподвижной насадкой работают в периодическом нестационарном режиме. Теплообменная поверхность (насадка) попеременно продувается то греющей, то охлаждающей газовой средой. Время, на протяжении которого насадка омывается греющей средой, называется периодом нагрева ( $\tau_1$ ); время, на протяжении которого нагретая насадка охлаждается, называется периодом охлаждения ( $\tau_2$ ). В каждом периоде температуры теплоносителей и насадки изменяются во времени. В связи с тем, что в регенераторах температуры изменяются не только в пространстве, но и во времени, при создании методов расчетов таких аппаратов возникают определенные трудности. Для инженерных расчетов предлагаются приближенные методы. Расчеты ведут по средним за период характеристикам, а тепловой поток относят не к единице времени, а к периоду.

Целью расчетов теплоутилизатора, который представляет собой регенератор с неподвижной насадкой, является определение необходимой поверхности теплообмена, массы и габаритных размеров для выбранного типа насадки. Тепловой

конструкторский расчет регенератора основывается на общих уравнениях (теплового баланса и теплопередачи), при учете специфики нестационарной работы регенератора. Разработанная методика отличается тем, что учитывается изменение коэффициента межкомпонентного теплообмена во времени [18]. Это позволяет получить более точные данные по значению площади теплообменной поверхности, соответственно, объема теплообменного аппарата с гранулированной насадкой.

Рабочий участок регенератора представляет собой цилиндрический канал, заполненный гранулированным материалом, через который пропускается поток газа из вытяжных устройств. Проходя слой материала, частицы нагреваются. Окончание периода нагрева материала определяется согласно данным экспериментов [19], показавшим, что оптимальным условием работы теплоаккумулятора на основе аппаратов с плотным неподвижным слоем является ограничение продолжительности периода нагрева конечной температурой, которая должна составлять 80% от значения температуры газа на входе. Дальнейший нагрев материала в аппарате сопровождается существенным снижением его эффективности.

Расчет ведется методом последовательных приближений и включает следующие пункты.

I. Следует задать:

Коэффициент межкомпонентного теплообмена  $\alpha_M$ , Вт/м<sup>2</sup>К; расход газа  $G_r$ , кг/с; начальную температуру газа  $t_r^0$ , °C; температуру гранулированного материала на входе  $t_M'$ , °C; конечную температуру газа в конце периода нагрева,  $t_{r,max}''=0,85 t_r'$ , °C; конечную температуру материала в конце периода нагрева,  $t_{M,max}''=0,8 \cdot t_r'$ , °C.

II. Выбрать:

Гранулированный материал, характерный размер частиц  $d_e$ , м; форму канала – цилиндрический горизонтальный;

III. Выполнить расчет по следующему алгоритму:

1. Определить согласно п. I температуру газа на выходе и температуру материала в конце периода нагрева, рассчитать средние значения температур газового и твердого компонентов:

$$\bar{t}_r = \frac{t_r' + \bar{t}_r''}{2}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\bar{t}_M = \frac{t_M' + t_{M,max}''}{2}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

2. По значению  $\bar{t}_r$ , °C определить теплофизические свойства газовой среды:  $\nu_r$ ;  $c_p$ ;  $\lambda_r$ ;  $\rho_r$ ;  $Pr_r$

3. Скорость фильтрации газовой среды:

$$w_\phi = \frac{G_r}{\rho_r \cdot S}, \text{ м/с} \quad (3)$$

4. Число Рейнольдса:

$$Re_r = \frac{w_\phi \cdot d_e}{\nu_r} \quad (4)$$

5. Теплота, переданная от воздуха к материалу:

$$Q = G_r \cdot c_p \cdot \left( t_r' - \frac{t_M^0 + t_{r,max}''}{2} \right), \text{ Вт} \quad (5)$$

где  $t_M^0$  – температура материала в начале периода нагрева.

6. Из зависимости  $Q = \bar{\alpha}_M \cdot F_M \cdot \Delta \bar{t}_r$  определить площадь поверхности гранулированного материала  $F_M$ . В первом приближении  $\bar{\alpha}_M$  принимаем заданным соответственно п. I:

$$F_M = \frac{Q}{\bar{\alpha}_M \cdot (\bar{t}_r - \bar{t}_M'')} \text{ м}^2 \quad (6)$$

$$\Delta \bar{t}_r = \frac{\Delta t_\delta - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_\delta}{\Delta t_M}} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7)$$

7. Определить массу загрузки материала по следующему алгоритму ( $n$  – количество частиц в аппарате):

$$F_M = 4\pi \cdot \left( \frac{d_e}{2} \right)^2 \cdot n \Rightarrow n = \frac{F_M \cdot \phi_M}{4\pi \cdot \left( \frac{d_e}{2} \right)^2} \quad (8)$$

$$m_M = V \cdot \rho_M \cdot n = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{d_e}{2} \right)^3 \cdot \rho_M \cdot n \quad (9)$$

8. Продолжительность нагрева:

$$\tau = \frac{m_M \cdot c_p \cdot (\bar{t}_M'' - t_M')}{Q}, \text{ с} \quad (10)$$

9. Рассчитать конечное значение  $\bar{\alpha}_M^k$  по эмпирическому уравнению [19] в безразмерном виде с учетом сигмоидального характера изменения коэффициента межкомпонентного теплообмена по времени.

$$Nu = \left[ \frac{-5,04}{1+10} \frac{1}{-1,63 \left( \frac{0,23 - G_r \cdot c_p \cdot \tau}{m \cdot c_p} \right)} + \frac{5,14}{1+10} \frac{1}{-1,32 \left( \frac{1,47 - G_r \cdot c_p \cdot \tau}{m \cdot c_p} \right)} + 0,44 \right] \cdot Re^{0,8} Pr^{0,43} \quad (11)$$

Для рассчитанного времени нагрева  $\tau$  находим  $\alpha_M$ , а дальше –  $\bar{\alpha}_M$ , Вт/м<sup>2</sup>К (как средневзвешенную

величину). Определяем отклонение заданного в п. I значения  $\alpha_m$  от рассчитанного.

10. Если сопоставление  $\bar{\alpha}_m$  с заданным показывает большое расхождение, следует перезадавать значением  $\alpha_m$  и провести расчет во втором приближении, начиная с п. 6.

11. При удовлетворительном согласовании расчет считать законченным. Как результат, получено значения  $F_M$ , м<sup>2</sup>;  $Q$ , Вт;  $m_M$ , кг;  $\tau$ , с.

12. Объем аппарата:

$$V = \frac{F_M}{a_{уд}}, \text{ м}^3 \quad (12)$$

где  $\phi_m$  - поправка на форму частиц;

$$a_{уд} = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_e}, \text{ м}^2/\text{м}^3 - \text{удельная поверхность частиц.}$$

Задавая диаметр канала  $D$ , найти высоту теплоутилизатора  $H$ :

$$H = V/S, \text{ м.} \quad (13)$$

По рекомендованной методике в качестве примера рассчитаны основные характеристики теплоутилизатора промышленного назначения с неподвижной насадкой. Теплообменный участок представляет собой цилиндрический канал, заполненный слоем керамзита, через который продувается поток газа из вытяжных устройств. Расход газа составляет  $G_r=0,11$  м<sup>3</sup>/с, температура газа на выходе из вытяжных устройств  $t'_r=80$  °С, на выходе из регенератора для периода нагрева  $t''_r=68$  °С. Начальная температура керамзита:  $t'_m=20$  °С, конечная температура материала в конце периода нагрева  $t''_m=64$  °С. Гранулированная насадка состоит из плотного слоя керамзита, эквивалентный диаметр частиц  $d_e=0,019$  м. В результате получены следующие характеристики аппарата: площадь поверхности частиц в аппарате  $F_M=8$  м<sup>2</sup>, передаваемый тепловой поток  $Q=4068$  Вт; масса гранулированного материала  $m_M=24,2$  кг; длительность периода нагрева  $\tau=224$  с, высота теплоутилизатора  $H=1,5$  м, эффективность аппарата  $\varepsilon=0,6$ . Значение эффективности  $\varepsilon=0,6$  для существующих теплообменников является хорошим показателем. Достоинством теплоутилизатора с неподвижной насадкой является отсутствие необходимости в организации движения слоя гранулированного материала, что существенно упрощает эксплуатацию и конструкцию теплообменника.

По предлагаемой методике был проведен расчет теплоутилизатора с неподвижным слоем, предназначенный для обогрева помещения,

расположенного непосредственно рядом с вентиляционными каналами предприятия, при указанных выше исходных данных по температурам. Особенностью данного теплоутилизатора является то, что в периоде нагрева передача теплоты осуществляется при непосредственном контакте газового потока с частицами материала, а в периоде охлаждения теплота передается от поверхности теплоутилизатора в окружающую среду. Расход газа через вытяжной канал составляет 400 м<sup>3</sup>/ч. Теплообменный участок теплоутилизатора представляет собой трубу диаметром 0,2 м и длиной 1 м. В результате получены следующие характеристики теплоутилизатора. Масса керамзитовой насадки:  $m=15$  кг. Время нагрева в теплоутилизаторе составляет 3 мин., время охлаждения - 30 мин.

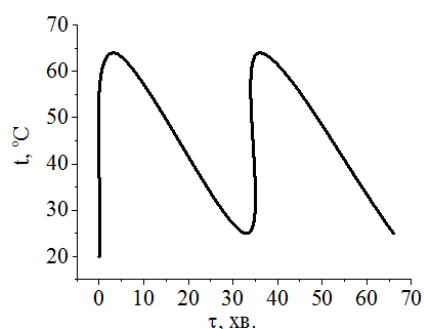


Рис. 1 – Циклограмма работы теплоутилизатора с плотным слоем керамзитовой насадки

Для обеспечения необходимого расхода воздуха 400 м<sup>3</sup>/ч при аэродинамическом сопротивлении слоя  $\Delta p=7,2 \cdot 10^3$  Па предлагается установить вентилятор высокого давления ВЦ 10-28, мощностью 0,12 кВт.

Для получения сглаженной характеристики нагрева помещения целесообразно теплоутилизатор выполнять из двух наполненных керамзитом труб и включать их поочередно.

### Обсуждение результатов

Существующие теплоутилизаторы регенеративного типа в основном разработаны для утилизации теплоты котельных и производств со средним уровнем тепловых выбросов. Их тепловой КПД изменяется от 79 % до 38 %, причем в среднем КПД составляет 55 %. Теплоутилизатор с движущимся плотным слоем керамзита, предназначенный для подогрева воздуха, характеризуется КПД на уровне 75 % [19]. Теплоутилизатор с неподвижным слоем гранулированного материала, рассчитанный для подогрева помещения, имеет КПД 60 %, тем не менее для его функционирования не существует необходимости в механизмах для организации движения насадки. Следует отметить, что повышение температурного уровня работы теплоутилизатора с

плотным слоем гранулированного материала значительно повышает КПД. Таким образом, рассчитанные теплоутилизаторы отличаются сравнительно высоким КПД для теплоутилизаторов с неподвижной насадкой и возможностью работы без прямого контакта частиц насадки с воздухом обогреваемого помещения. Рассчитанные на низкопотенциальную теплоту конструкции теплоутилизаторов предлагаются для использования на предприятиях пищевых производств.

### Выводы

Методика теплового расчета теплоутилизатора с неподвижной гранулированной насадкой, предназначенного для утилизации низкопотенциальной теплоты отходящих газов, позволяет оценить основные геометрические характеристики аппарата, его эффективность и продолжительность периода нагрева. Для теплоутилизаторов с неподвижной насадкой существует возможность работы без прямого контакта частиц насадки с окружающим воздухом в периоде охлаждения. Предлагаемые теплоутилизаторы рассчитаны на низкопотенциальную теплоту. Для получения сглаженной характеристики нагрева помещения целесообразно теплоутилизатор выполнять из двух наполненных керамзитом труб и включать их поочередно.

### Список литературы

1. **Ефимов, А. В.** Система глубокой утилизации теплоты газов, уходящих из котельных агрегатов / **А. В. Ефимов, А. Л. Гончаренко, Л. В. Гончаренко** // *Вісник НТУ «ХПІ». Енергетичні та теплотехнічні процеси та устаткування*. – 2013. – Т. 13, № 987. – С. 73-80.
2. **Долінський, А. А.** Основні положення концепції національної стратегії теплозабезпечення населених пунктів України / **А. А. Долінський, Б. І. Басок, Є. Т. Базеев, Г. П. Кучин** // *Промышленная теплотехника*. 2009. – Т. 31, №4. – С. 68-77.
3. **Фиалко, Н. М.** Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок различного типа / **Н. М. Фиалко, Ю. В. Шеренковский, А. И. Степанова, Р. А. Навродская, П. К. Голубинский, М. А. Новаковский** // *Промышленная теплотехника*. – 2008. – Т. 30, №3. – С. 68-76.
4. Закон України «Про енергозбереження» від 01.07.1994 р. № 74/94-ВР. Відомості Верховної Ради України. 1994 р. № 30. Ст. 283.
5. **Ammar, Y.** Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK / **Y. Ammar, S. Joyce, R. Norman, Y. Wang, A. P. Roskilly** // *Applied Energy*. – 2012. – Vol. 89, № 1. – P. 3-20. –doi: 10.1016/j.apenergy.2011.06.003.
6. **Долінський, А. А.** Состояние и перспективы использования вторичных энергоресурсов в энергетическом хозяйстве Украины / **А. А. Долінський, Н. М. Фиалко, Р. А. Навродская, Н. В. Гнедой** // *Промышленная теплотехника*. – 2012. – Т. 34, №4. – С.

- 94-103.
7. **Арнов, Р. И.** Состав и структура топливно-энергетических ресурсов промышленного предприятия / **Р. И. Арнов**. – Москва: Информ, 2007. – 215 с.
8. **Поспелова, Т. Г.** Основы энергосбережения / **Т. Г. Поспелова**. – Минск, 2000. – 350 с.
9. **Bohuslav, K.** Preliminary Design and Analysis of regenerative heat exchanger / **K. Bohuslav, Zdeněk J.** // *Chemical engineering transactions*. – 2016. – Vol. 52. – P. 655-660. – doi: 10.3303/cet1652110.
10. **Snider, D. M.** Three fundamental granular flow experiments and CPFD predictions / **D. M. Snider, M. S. Dale** // *Power Technology*. – 2007. – Vol. 176. – P. 36-46. – doi: 10.1016/j.powtec.2007.01.032.
11. **Chandratilleke, T. T.** Thermal performance and optimisation of a granular-bed heat recuperator / **T. T. Chandratilleke, N. Nadim, K. Batsioudis** // *Fluid Mechanics and Thermodynamics: Material of 12th International Conference on Heat Transfer. (Costa de Sol, Spain)*. Costa de Sol. – 2016. – P. 183-187. – doi: 10.1615/ichmt.2008.cht.930.
12. **Alizadeh, M.** Development of Free Cooling Based Ventilation Technology for Building: Energy Storage Unit, Performance Enhancement Techniques and Design Considerations-A review / **M. Alizadeh, S. M. Sadrameli** // *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 58. – P. 619-645. – doi: 10.1016/j.rser.2015.12.168.
13. **Горбис, З. Р.** Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями / **З. Р. Горбис, В. А. Календерьян**. Москва: Энергия, 1975. – 296 с.
14. **Sadrameli, S. M.** Mathematical modeling and simulation of thermal regenerators including solid radial conduction effects / **S. M. Sadrameli, H. R. V. Ajdari** // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Vol. 76. – P. 441-446. – doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.11.035.
15. **Ferreira, L. M.** An analytical and experimental study of heat transfer in fixed bed / **L. M. Ferreira, J. A. M. Castro, A. E. Rodrigues** // *International Journal of Heat and Mass transfer*. – 2002. – Vol. 45. – P. 95-196. – doi: 10.1016/S0017-9310(01)00209-5.
16. **Adeyanju, A. A.** Theoretical and Experimental Investigation of Heat Transfer in Packed Beds / **A. A. Adeyanju, K. Manohar** // *Research Journal of Applied Sciences*. – 2009. – Vol. 4., №5. – P. 166-177. – doi: 10.1016/j.enconman.2012.07.025.
17. **Nie, X. D.** Heat transfer between gas-solid phases within packed particle beds / **X. D. Nie, R. W. Besant, R. W. Evitts** // *Particulate science and technology: an international journal*. – 2010. – Vol. 29, №2. – P. 151-162. – doi: 10.1080/02726351.2010.536302.
18. **Бошкова, И. Л.** Разработка теплообменника с неподвижной гранулированной насадкой для утилизации низкопотенциальной теплоты / **И. Л. Бошкова, А. В. Солодка, Н. В. Волгушева** // *Холодильна техніка і технологія*. – 2018. – Т. 54 (1). – С. 11-15.
19. **Солодка, А. В.** Інтенсифікація теплообміну в теплоутилизаторах з гранульованою насадкою. Автореф. дис. ...к.т.н. зі спеціальності 05.14.06 Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – ОНАХТ, Одеса. – 2017. – 24 с.

### References (transliterated)

1. **Efimov, A. V., Goncharenko, A. L., Goncharenko, L. V.** Sistema glubokoy utilizatsii teploty gazov, uhodyaschih iz

- kotelnykh agregatov [A system for the deep utilization of the heat of gases leaving boiler units]. *Visnyk NTU «KhPI». Energetychni ta teplotexnichni procesy ta ustatkuvannya [Bulletin of the NTU "KhPI". Energy and heat engineering processes and equipment]*, 2013, **13**(987), 73-80.
2. **Dolins'kyj, A. A., Basok B. I., Bazeev Ye. T., Kuchy`n G. P.** Osnovni polozhennya koncepciyi nacional'noyi strategiyi teplozabezpechennya naseleny`x punktiv Ukrainy [Main provisions of the concept of the national heat supplying policy of settlements of Ukraine]. *Promyshlennaya teplotekhnika. [Industrial heat engineering]*, 2009, **31**(4), 68-77.
  3. **Fialko, N. M., Sherenkovsky`j, Yu. V., Stepanova, A. Y., Navrodska, R. A., Goluby`nsky`j, P. K., Novakovsky`j, M. A.** Effektivnost sistem utilizatsii teploty othodyaschih gazov energeticheskikh ustanovok razlichnogo tipa [Efficiency of systems for utilization of heat from waste gases of power plants of various types]. *Promyshlennaya teplotekhnika. [Industrial heat engineering]*, 2008, **30**(3), 68-76.
  4. Zakon Ukrainy `«Pro energozberezheniya» vid 01.07.1994 r. № 74/94-VR. Vidomosti Verhovnoyi Rady` Ukrainy 1994, № 30. St. 283. [Law of Ukraine "On Energy Saving" of 07.07.1994 № 74/94-BP. Information from the Verkhovna Rada of Ukraine, 1994, No. 30, Art. 283].
  5. **Ammar, Y., Joyce, S., Norman, R., Wang, Y., Roskilly, A. P.** Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK. *Applied Energy*, 2012, **89**(1), 3-20, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.06.003.
  6. **Dolinskiy, A. A., Fy`alko, N. M., Navrodska, R. A., Gnedoj, N. V.** Costoyanie i perspektivy ispolzovaniya vtorichnykh energoresursov v energeticheskom hozyaystve Ukrainy [State and prospects of using secondary energy resources in the energy sector of Ukraine]. *Promyshlennaya teplotekhnika. [Industrial heat engineering]*, 2012, **34**(4), 94-103.
  7. **Arnov, R. I.** Sostav i struktura toplivno-energeticheskikh resursov promyshlennogo predpriyatiya. [The composition and structure of the fuel and energy resources of an industrial enterprise]. *Moskva: Inform. [Moscow: Inform]*, 2007, 215.
  8. **Pospelova, T. G.** Osnovy energosberezheniya. [Basics of energy saving]. Minsk, 2000, 350.
  9. **Bohuslav, K., Zdeněk, J.** Preliminary Design and Analysis of regenerative heat exchanger. *Chemical engineering transactions*, 2016, **52**, 655-660, doi: 10.3303/cet1652110.
  10. **Snider, D. M., Dale, M. S.** Three fundamental granular flow experiments and CPFD predictions. *Power Technology*, 2007, **176**, 36-46, doi: 10.1016/j.powtec.2007.01.032.
  11. **Chandratilleke, T. T., Nadim, N., Batsioudis, K.** Thermal performance and optimisation of a granular-bed heat recuperator. *Fluid Mechanics and Thermodynamics: Material of 12th International Conference on Heat Transfer. (Costa de Sol, Spain). Costa de Sol*, 2016, 183-187, doi: 10.1615/ichmt.2008.cht.930.
  12. **Alizadeh, M., Sadrameli, S. M.** Development of Free Cooling Based Ventilation Technology for Building: Energy Storage Unit, Performance Enhancement Techniques and Design Considerations-A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, **58**, 619-645, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.168.
  13. **Gorbis, Z. R., Kalenderyan, V. A.** Teploobmenniki s protochnymi dispersnyimi teplonositelyami [Heat exchangers with dispersed flow coolants]. Moskva: Energiya, 1975, 296 p.
  14. **Sadrameli, S. M., Ajdari, H. R. B.** Mathematical modeling and simulation of thermal regenerators including solid radial conduction effects. *Applied Thermal Engineering*, 2015, **76**, 441-446, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.11.035.
  15. **Ferreira, L. M., Castro, J. A. M., Rodrigues, A. E.** An analytical and experimental study of heat transfer in fixed bed. *International Journal of Heat and Mass transfer*, 2002, **45**, 95-196, doi: 10.1016/S0017-9310(01)00209-5.
  16. **Adeyanju, A. A., Manohar, K.** Theoretical and Experimental Investigation of Heat Transfer in Packed Beds. *Research Journal of Applied Sciences*, 2009, **4**(5), 166-177, doi: 10.1016/j.enconman.2012.07.025.
  17. **Nie, X. D., Besant, R. W., Evitts, R. W.** Heat transfer between gas-solid phases within packed particle beds. *Particulate science and technology: an international journal*. 2010, **29**(2), 151-162, doi: 10.1080/02726351.2010.536302.
  18. **Boshkova, I. L., Solodkaya, A. V., Volgusheva, N. V.** Razrabotka teploobmennika s nepodvizhnoy granulirovannoy nasadkoy dlya utilizatsii nizkopotentsialnoy teploty [Development of a heat exchanger with a fixed granular nozzle for the utilization of low-grade heat]. *Xolody`na texnika i texnologiya. [Refrigeration technology and technology]*. 2018, **54**(1), 11-15.
  19. **Solodka, A. V.** Intensy`fikatsiya teploobminu v teplouty`ly`zatorax z granul`ovanoju nasadkoyu. [Intensification of heat exchange in heat-recovery tanks with granular nozzle] Avtoref. dy`s. ... k.t.n. zi special`nosti 05.14.06 Texnichna teplofizy`ka ta promy`slova teploenergety`ka. [Thesis for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.14.06 Technical thermophysics and industrial thermal power engineering]. ONAChT, Odessa, 2017, 24.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Бошкова Ирина Леонидовна** – доктор технических наук, профессор, Одесская национальная академия пищевых технологий, профессор кафедры теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей, г. Одесса, Украина; e-mail: boshkova.irina@gmail.com.

**Irina Boshkova** – Doctor of technical sciences, Professor, Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transportation department, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine; e-mail: boshkova.irina@gmail.com.

**Волгушева Наталья Викторовна** – кандидат технических наук, Одесская национальная академия пищевых технологий, доцент кафедры теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей, г. Одесса, Украина; e-mail: natvolgusheva@gmail.com.

**Natalya Volgusheva** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transportation department, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine, e-mail: natvolgusheva@gmail.com.

**Солодка Антонина Васильевна** – кандидат технических наук, Одесская национальная академия пищевых технологий, ассистент кафедры теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей, г. Одесса, Украина; e-mail: solodkaya140619@gmail.com.

**Antonina Solodka** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Assistant, Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transportation department, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine; e-mail: solodkaya140619@gmail.com.

**Бошков Леонід Зиновьевич** – кандидат технічних наук, доцент, Одеська національна академія пищевих технологій, доцент кафедри термодинамики і возобновляємої енергетики, г. Одеса, Україна; e-mail: leonidboshkov@i.ua.

**Leonid Boshkov** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Thermodynamics and Renewable Energy department, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine; e-mail: leonidboshkov@i.ua.

*Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Бошкова, И. Л.** Методика теплового расчета теплоутилизатора с плотным слоем гранулированного материала / **И. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева, А. И. Солодка, Л. З. Бошков** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 3-9. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.01.

*Please cite this article as:*

**Boshkova, I., Volgusheva, N., Solodka, A., Boshkov, L.** Method of thermal calculation of a heat exchanger with a dense layer of granulated material. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), 3-9, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.01

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Бошкова, І. Л.** Методика теплового розрахунку теплоутилизатора з щільним шаром гранульованого матеріалу / **І. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева, А. В. Солодка, Л. З. Бошков** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 3-9. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.01.

**АНОТАЦІЯ** Розглядається можливість використання низькопотенційних теплових вторинних енергоресурсів у вигляді газів, що відходять від промислових підприємств незначною енергетичної потужності, зокрема, харчових. Аналізуються теплоутилизатори з нерухомим щільним шаром гранульованих матеріалів, що забезпечують безпосередній теплообмін газу (повітря) з частками. Вказується на недостатню кількість ефективних розробок теплоутилизаторів низькопотенційної теплоти і відомостей по раціональним тепловим режимам їх роботи. Відзначається ефективність застосування гранульованих матеріалів у теплоенергетиці з позиції інтенсифікації процесів перенесення теплоти і маси. Описана методика теплового розрахунку контактного теплоутилизатора для визначення його геометричних характеристик і основних параметрів процесу. Запропонована методика враховує зміну коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну в часі. Наведено результати розрахунків основних характеристик теплоутилизатора промислового призначення з нерухомою насадкою. В теплоутилизаторі з нерухомою насадкою не виникає необхідності в організації руху шару гранульованого матеріалу, що істотно спрощує експлуатацію і конструкцію теплообмінника. Представлені результати розрахунку теплоутилизатора з нерухомим шаром, призначеного для обігріву приміщення, розташованого безпосередньо поруч з вентиляційними каналами підприємства. У запропонованому теплоутилизаторі в періоді нагріву передача теплоти здійснюється при безпосередньому контакті газового потоку з частинками матеріалу, а в періоді охолодження теплота передається від зовнішньої поверхні теплоутилизатора в навколишнє середовище. Для отримання згладженої характеристики нагріву приміщення доцільно дублювати наповнені гранульованим матеріалом робочі канали теплоутилизатора і включати їх по черзі. Розрахований теплоутилизатор відрізняється порівняно високим значенням коефіцієнта корисної дії і можливістю роботи без прямого контакту частинок насадки з повітрям, що обігрівається. Розраховані на низькопотенційну теплоту конструкції теплоутилизаторів пропонуються для використання на підприємствах харчових виробництв.

**Ключові слова:** утилізація; низькопотенційна теплота; ефективність; коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну; нерухомий шар; керамзит

*Поступила (received) 10.02.2019*