

Investigation of Heat Exchange Efficiency in the Heat Exchanger Waste Heat Recovery with Granular Nozzle

Boshkova I.L., Solodkaya A.V.

The Department of power engineering and pipeline transport energy carriers
Institute of Refrigeration, Cryogenic Technologies and EcoEnergetic
Odessa National Academy of Food Technologies,
Odessa, Ukraine

Abstract. The article analyzes the characteristics of the heat transfer process between the dispersed and gaseous medium for the moving and fixed layer of particulate material. The methods of calculus of thermal and hydraulic regimes of heat exchangers with a dense layer of particles were elaborated. The results of experimental studies of the process of heating of different kinds of granular material, intended for use as a nozzle in the recuperative heat exchanger. The influence of the height of heating chamber, the particle diameter on the output temperature of the granular material has been determined. The dependence of the temperature of the gas and solid components of the height of the nozzle has been presented.

Keywords: a granular material, a nozzle, the heat transfer coefficient, Interconnects heat exchange, intensification, aerodynamic drag.

Studiu de eficiență a transferului de căldură în schimbătorul de căldură cu recuperarea căldurii reziduale cu duză granulare inclusă

Boșcova Irina, Solodcaia Antonina

Departamentul de energie termică și transport prin conducte a resurselor energetice
Institutul de frig, criotehnologii și ecoenergetică
Academia națională a tehnologiilor alimentare din Odessa
Odesa, Ucraina

Rezumat. Utilizarea agenților termici în flux p răcire sub formă de material granular permite intensificarea proceselor de schimb de căldură și de transfer de masă. Apare oportunitatea de a crea o suprafață de schimb de căldură dezvoltată, creșterea căreia este condiționată totalitatea suprafețelor particulelor materialului granulat inclus ca componentă funcțională a schimbătorului de căldură. Promițătoare sunt schimbătoarele de căldură recuperative cu un strat mobil dens, caracterizate prin eficiența termică ridicată, compactitate, greutate redusă, simplitatea de proiectare, fiabilitate, ce oferă o performanță semnificativă. Având în vedere complexitatea proceselor de interacțiune a particulelor din fluxul de aer în mișcare o atenție deosebită trebuie acordată metodei simplitate de calcul al acestor schimbătoare de căldură. Articolul analizează caracteristicile procesului de transfer de căldură între mediul gazos dispersat pentru stratul materialului granulat aflat în stare de mișcare și în stare de repaos. S-au propus metode de calcul a regimurilor termic și hidraulic a schimbătoarelor de căldură cu strat dens dispersat format din particule granulate. Sunt prezentate rezultate ale cercetărilor experimentale a procesului de încălzire a diverselor tipuri de material granulat propuse pentru utilizare în calitate de material funcțional în schimbătoarele utilizatoare de căldură de tip recuperativ. În baza calculelor s-a stabilit influența înălțimii camerei de ardere, a diametrului particulelor asupra temperaturii de ieșire a materialului granular. Se prezintă caracteristica evoluției temperaturii componentei gazoase și a componentei solide în funcție de înălțimea duzei.

Cuvinte-cheie: material granular, duză, coeficientul de transfer de căldură, schimb de căldură mutual, intensificarea, rezistența aerodinamică.

Исследование эффективности теплообмена в теплообменниках-утилизаторах с гранулированной насадкой

Бошкова И.Л., Солодкая А.В.

Кафедра теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей
Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики
Одесская национальная академия пищевых технологий
Одесса, Украина

Аннотация. Использование в теплоэнергетике проточных теплоносителей в виде гранулированного материала позволяет интенсифицировать процессы теплообмена и массообмена. Возникает возможность создать развитую теплообменную поверхность, которой является совокупная поверхность частиц, находящихся в теплообменном аппарате. Перспективными являются рекуперативные теплообменники с плотным движущимся слоем, характеризующиеся высокой тепловой эффективностью, компактностью, небольшой массой, простотой конструкции, надежностью, позволяющие обеспечить значительную

производительность. Ввиду сложности процессов взаимодействия движущихся частиц с потоком воздуха, особое внимание следует уделять упрощенным методикам расчета подобных теплообменников. В статье проведен анализ особенностей процесса теплообмена между дисперсной и газовой средой для движущегося и неподвижного слоя дисперсного материала. Составлены методики теплового и гидравлического расчетов теплообменных аппаратов с плотным дисперсным слоем. Представлены результаты экспериментального исследования процесса нагрева различных видов гранулированного материала, предполагаемых к использованию в качестве насадки в рекуперативном теплообменнике-утилизаторе. Расчетным путем установлено влияние высоты камеры нагрева, диаметра частиц на выходную температуру гранулированного материала. Представлена зависимость температуры газового и твердого компонентов по высоте насадки.

Ключевые слова: гранулированный материал, насадка, коэффициент теплоотдачи, межкомпонентный теплообмен, интенсификация, аэродинамическое сопротивление.

1. Введение

Одним из определяющих путей экономии топливно-энергетических ресурсов является использование вторичных энергоресурсов. Совершенствование технологического процесса за счет дополнения схемы утилизации ВЭР способствует повышению конкурентоспособности продукции и снижению загрязняющего воздействия на окружающую среду. В результате анализа тепловых потерь в энергетических и теплотехнологических установках различного назначения получено [1], что их значительную часть составляет физическая теплота уходящих газов, использование которой должно быть направлено на повышение тепловой эффективности самих установок. Представляются перспективными регенеративные теплообменники, в которых в качестве промежуточного теплоносителя (насадки) служит циркулирующий слой дисперсного материала. Однако технико-экономическая целесообразность применения дисперсной насадки в качестве промежуточного теплоносителя не всегда оправдана [2], что связано, в основном, с низкими температурными напорами теплоносителей, большим гидравлическим сопротивлением аппарата, загрязнением поверхностей теплообмена со стороны греющего теплоносителя различными отложениями или ее разрушением за счет коррозии или эрозии. Анализ теоретических и экспериментальных работ [3-5], в которых исследованы тепловые процессы, определяющие эффективность работы таких теплообменников, показал, что в настоящее время отсутствуют надежные общепринятые зависимости, которые послужили бы научной базой для разработки методики расчета утилизаторов подобного типа и

способствовали их внедрению в промышленности.

Целью работы является оценка влияния параметров теплообмена и характеристик материала на эффективность утилизации теплоты отходящих газов гранулированной насадкой. Для достижения данной цели проведено аналитическое и экспериментальное исследование теплообмена в теплообменнике-утилизаторе с движущимся плотным слоем насадки.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПЛОТНОМ СЛОЕ ГРАНУЛИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА

Задачами исследования являлись: экспериментальное изучение процессов теплообмена между нагретым воздухом и гранулированным материалом, помещенным в рабочую камеру, и получение рекомендаций к выбору материала; математическое моделирование теплообмена в системе воздух - плотный слой движущегося гранулированного материала.

Экспериментальная установка представлена на рис. 1.

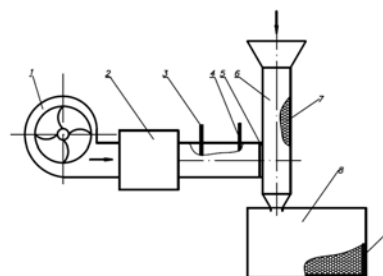


Рис. 1. Установка для экспериментального исследования теплообмена в плотном слое гранулированного материала.

1- вентилятор; 2 – нагреватель; 3 – датчик скорости воздуха; 4 – датчик температуры; 5 – сетка; 6 - камера нагрева; 7 – гранулированная насадка; 8 – камера сбора нагретого материала; 9 – изоляция.

В качестве гранулированного материала исследовался керамзит и гравий (размер частиц: 10-20 мм). Методика заключалась в следующем. В рабочую камеру 6 загружался гранулированный материал. Включался вентилятор 1 и нагреватель 2, после чего нагретый воздух поступал в рабочую камеру. Датчики 3 и 4 предназначены для измерения температуры и скорости потока, температура материала определялась в течение опыта с помощью термомпары 10, расположенной по центру камеры. Средняя скорость фильтрации воздуха составляла $w = 0,25 \dots 1,2$ м/с, диаметр воздуховода $d = 0,1$ м.

Результаты экспериментов представлены в табл. 1, 2. Скорость воздуха составляла 0,63 м/с – для керамзита, 0,5 м/с – для гравия, высота слоя 0,12 м.

Таблица 1
Нагрев гравия в рабочей камере

τ, c	$t_{гр}, ^\circ C$	$Q_{гр}, Вт$	$t_{в}''', ^\circ C$	$t_{в}', ^\circ C$	$Q_{в}, Вт$	$\Delta \bar{t}_{лог}$
0	21	0	18,4	60	0	0
30	27	539	21,2	60	740	2.6
60	28	90	33,6	58.6	504	6.4
90	29	90	37,3	58.9	433	7.2
120	30	90	41,1	57.4	361	7.8
150	33	269	43,6	59.9	313	7.82
180	35	180	46,7	58.9	254	7.5
210	38	269	48,5	57.4	219	6.96
240	39	90	50,4	58.0	183	6.5
270	40	90	52,1	57.1	151	6.5
300	42	180	53,3	58.6	128	6.2
330	44	180	54,3	59.3	109	5.6
360	45	90	55,3	59.9	90	5.2
390	47	180	55,4	58.1	88	4.6
420	47	0	56,1	59.0	74	4.4
450	48	90	56,6	61.2	65	3.9
480	49	90	56,9	58.9	59	4
510	50	0	57,1	61.3	55	3.6
540	50	0	57,4	61.5	48	3.4
570	50	0	57,7	62.5	44	3.5
600	51	90	57,5	60.0	48	3.3

Таблица 2
Нагрев керамзита в рабочей камере

τ, c	$t_{к}, ^\circ C$	$Q_{к}, Вт$	$t_{в}''', ^\circ C$	$t_{в}', ^\circ C$	$Q_{в}, Вт$	$\Delta \bar{t}_{лог}$
1	2	3	4	5	6	7
0	18,5	0	18,5	18.4	700	
30	23,4	122	25	60	601	6.9
60	39,4	398	29	58.6	542	4.6
90	48,4	223	32	58.9	492	3.7
120	53,0	114	38	57.4	395	3.4
150	55,0	50	43	59.9	310	2.9
180	56,5	37	46	58.9	257	2.3
Продолжение таблицы 2						
1	2	3	4	5	6	7
210	58,0	37	48	57.4	223	1.8
240	58,8	20	49	58.0	205	1.5
270	58,9	3	51	57.1	169	1.4
300	59,3	10	52	58.6	150	1.1
330	59,4	3	52	59.3	150	1.1
360	59,5	3	52	59.9	150	1
390	59,4	0	52	58.1	150	1
420	60	15	52,5	59.0	141	1
450	59,4	0	53	61.2	132	1
480	59,4	0	53	58.9	132	1
510	60,4	24	53	61.3	132	1
540	60,1	7	53	61.5	132	1
570	59,6	0	53	62.5	132	1
600	59,8	5	53	60.0	132	1

Данные свидетельствуют, что с течением времени теплота, поглощённая материалом, снижается, причем для керамзита это снижение резко усиливается после 360 с, а для керамзита – после 480 с, что связано с изменением среднеарифметического температурного напора. Характер изменения теплоты во времени следует учитывать при оценке длительности периода нагрева в теплообменном аппарате при их проектировании.

Характер изменения температуры материала (гравий) в зависимости от скорости фильтрации демонстрирует рис. 2. Видно, что 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. Очевидно, структура керамзита и особенно свойства его поверхности способствуют более интенсивному теплообмену с окружающей средой (воздухом).

Для сравнения эффективности применения насадок, на рис. 4 представлен график

изменения температур, полученных для керамзита и гравия, при скорости фильтрации $w = 1,2$ м/с.

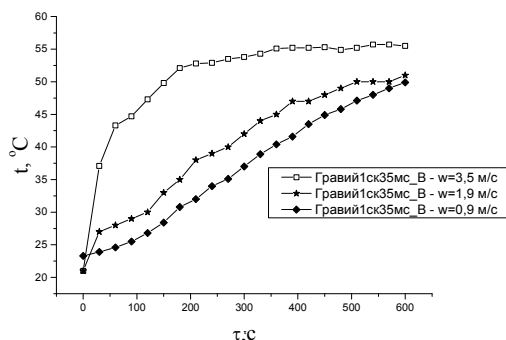


Рис. 2. Нагрев гравия в рабочей камере при различной скорости фильтрации воздуха

Влияние скорости при нагреве насадки из керамзита значительно меньше, чем для гравия.

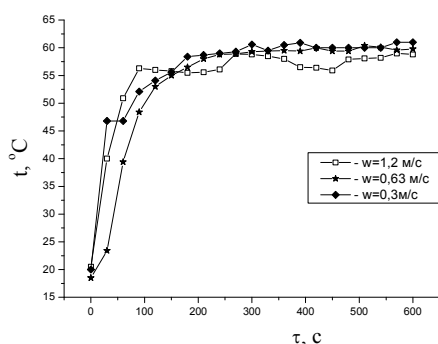


Рис. 3. Нагрев керамзита в рабочей камере при различной скорости фильтрации воздуха

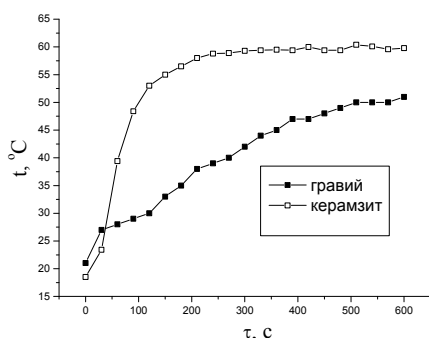


Рис. 4. График изменения температуры насадки в зависимости от вида материала

Для того, чтобы эффективность теплообмена с гравием была сопоставима с керамзитом, скорость фильтрации должна быть увеличена, причем, как показывают

данные, до более высоких значений, установленных в эксперименте.

3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА

Влияние высоты канала и диаметра частиц определялась в ходе вычислительного эксперимента, проведенного с использованием зависимостей для газового (воздух) (1) и твердого (2) компонентов. Зависимости были получены при решении математической модели процесса теплообмена плотного слоя гранулированного материала с газовой средой. При составлении модели принималось, что поток частиц движется под действием гравитационных сил вниз, а поток воздуха направляется противотоком снизу. Рассматривается одномерная стационарная задача при следующих условиях однозначности:

Граничные условия:

$$x = 0 : t_2 = t_{20}$$

$$x = L : t_m = t_{m0}$$

Начальные условия:

$$\tau = 0 : t_2 = t_{20}; t_m = t_{m0}$$

Здесь w_m'' , w_2'' - скорости слоя и воздуха в контактном теплообменнике, L - высота слоя, x - продольная координата.

$$tg(x) = C1 + C2e^{\frac{K2(-K4+K3)x}{K4K3}}, \quad (1)$$

$$tm(x) = \frac{K4C1 + C2e^{\frac{K2(-K4+K3)x}{K4K3}}}{K4}, \quad (2)$$

где $C1$, $C2$ – коэффициенты, определяемые заданным условием однозначности, форма которых представлена зависимостями (3), (4): Из данного выражения были найдены коэффициенты $C1$ и $C2$,

$$C1 = tg0 + \frac{K4(tg0 - tm0)}{-K4 + e^{K5 \cdot L \cdot K3}}, \quad (3)$$

$$C2 = -\frac{K4(tg0 - tm0)}{-K4 + e^{K5 \cdot L \cdot K3}}, \quad (4)$$

Коэффициенты $K2$, $K3$, $K4$ представляют собой комбинации из заданных величин, характеризующих процесс:

$$K2 = \alpha_M \cdot a_{y\partial}, \quad (5)$$

где α_M – коэффициент межкомпонентного теплообмена, определяемый по рекомендациям [6], $a_{y\partial}$ – удельная поверхность частиц в единице объема.

$$K3 = c_2 \cdot \rho_2 \cdot w, \quad (6)$$

На рис. 5 представлены результаты расчета температуры гранулированного материала при различных диаметрах частиц. Исходные данные, принятые при расчете, следующие: $t_2' = 60^\circ\text{C}$, $t_m' = 20^\circ\text{C}$, $w_2 = 1,2 \text{ м/с}$, $L=0,12 \text{ м}$. Видно, что с увеличением диаметра частиц их температура уменьшается. Это связано с тем, что при нагреве частиц с меньшим диаметром интенсивность межкомпонентного теплообмена выше. Однако последующее охлаждение частиц с меньшим диаметром будет происходить также быстро, поэтому для достижения аккумулирующего эффекта в аппарат целесообразно выбрать материал с диаметром частиц 0,02-0,03 м.

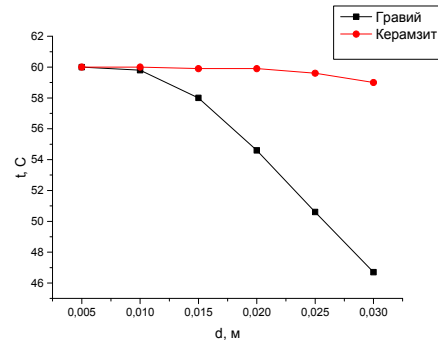


Рис. 5 Зависимость температуры насадки от диаметра частиц. 1 – керамзит; 2 – гравий

На рис. 6 представлены результаты расчета распределения температуры гранулированного материала по высоте насадки.

Здесь за начало координат принято сечение, на котором осуществлялась засыпка материала: верхнее сечение канала на высоте L . На начальном участке интенсивность теплообмена выше вследствие большего температурного напора и высоких значений коэффициента межкомпонентного теплообмена [5], [6].

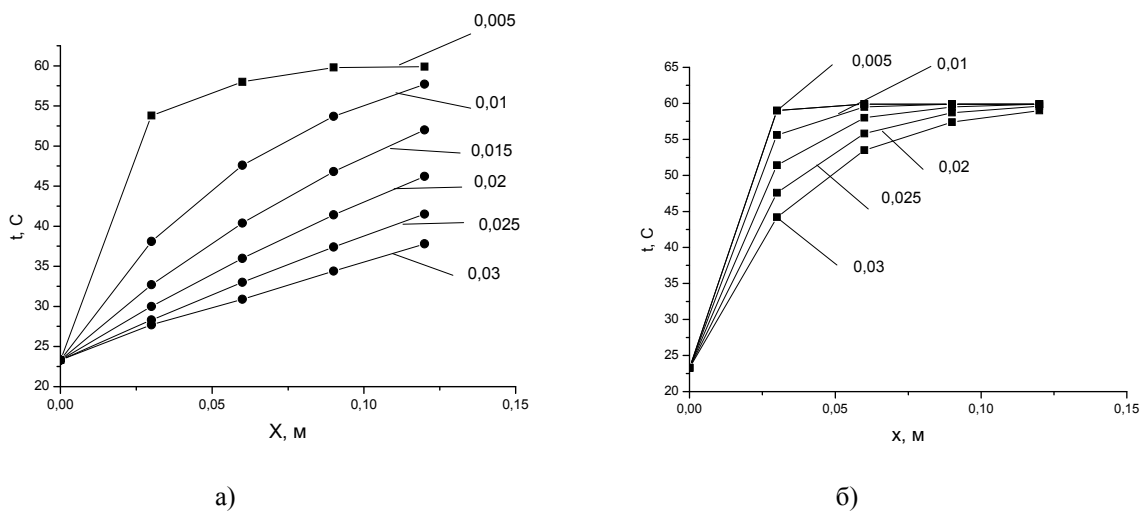


Рис. 6. Изменение температуры гранулированного материала (гравий) по высоте насадки при различных диаметрах частиц а – гравий, б – керамзит

4. ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Q - тепловой поток, Вт;
 m - масса материала, кг;
 w - скорость, м/с;
 d - диаметр, мм;

t - температура, °C;
 τ - время, с;
 α_M - коэффициент межкомпонентного теплообмена; $a_{y\partial}$ - удельная поверхность частиц;

L - высота твердого слоя, м;
 x - координата по высоте, м;
 c - удельная теплоемкость, Дж/(кгК);
 ρ - плотность, кг/м³.

Индексы: m – твердый материал; g - газ; гр – гравий; к – керамзит; в – воздух; 0 – начальное значение.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность теплообмена газовой среды (воздух) с гранулированной насадкой существенно зависит от вида используемого материала, диаметра частиц и скорости фильтрации. Увеличение скорости в пределах (0,3-0,62) м/с менее сказывается на росте температуры гравия по высоте канала, чем при скорости 1 м/с, при этом температура материала стабилизируется в течение 300 с. Влияние скорости в исследованном диапазоне на нагрев керамзита практически не наблюдается, стабилизация теплового режима происходит в течение 200 с. Предложенные аналитические зависимости для расчета температур газового и твердого компонентов адекватно описывают изменение температур при теплообмене между газовой (воздушной) средой и плотным слоем гранулированного материала.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

[1] D. A. Prutskih Ghidrodinamika i teploobmen v gherenatore s dispersnoi nasadkoi,

[Hidrodynamic and heat-mass transfer in generators with a dispersed generator nozzle] Avtoreferat diss. na soiskanie uch. stepeni k. t. n. Spetsialnosti: Voronej: 2009, 22 p.

[2] A.V. Barakov, D.A. Prutskih K raschetu reghenerativnogo vozduhopodogrevatelea nepre-ryvnogo deistvia. [The calculus of regenerative continious air heater] Vestnik Voronejskogo gosudarstvenogo tehniceskogo universiteta [Proceedings of Voronej University], 2006, T. 2, Nr 6, pp. 11-14.

[3] A.V. Barakov, V.Iu. Dubanin, D.A. Prutskih. Issledovanie teploobmena v reghenatore s dispersnoi nasadkoi. [The research of heat mass transfer in the regenerator with dispersed nozzle] Energoberejenie i vodopodgotovka, [Eneergy efficiency and water processing], 2007, Nr 4, pp. 45-46.

[4] A.V. Barakov, V.Iu. Dubanin, D.A. Prutskih. Issledovanie teplovoi effektivnosti reghenerativnogo vozduhopodogrevatelea s dispersnoi nasadkoi, [The research of thermal efficcency of the regenerator with dispersed nozzle] Promyshlennaia energhetika [Industrial energetics]. 2008, Nr 5, pp. 28-30.

[5] V.A. Kalenderian, V.R. Gappasov. Teploperenos v vozguhoohladitele s plotnym dvijuschimsea sloem promejutochnogo teplonositelea. [Heat transfer in air cooler with dense moving layer of intermediate heat transfer agent]. Tezisy dokladov I soobschenii IV Miskogo mejd. forum po teploomassoobmenu, [The proceedings of Minsk international heat mass transfer forum] Minsk, 2000, t.6, pp.175-182

[6] Z.R. Gorbis, V.A. Kalenderian. Teploobmenniki s protochnymi dispersnymi teplonositelemi. [Heat exchangers with flow particulate heat carriers] Moskva, 1975, 294 p.

Сведения об авторах:



Бошкова Ирина Леонидовна. Доцент кафедры теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей Одесской национальной академии пищевых технологий, ведущий научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории, работает с 2006 г. над выполнением научных проектов, связанных с исследованием процессов термообработки материалов растительного происхождения с использованием энергии микроволнового поля.



Солодкая Антонина Васильевна. Закончила Одесскую национальную академию пищевых технологий в 2013 г. по специальности теплоэнергетика. В 2014 г. поступила в аспирантуру, специальность 05.14.06 «Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика»

Articolul a fost prezentat la Conferinta "Energetica Moldovei 2016"