

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ НАСКРІЗНОГО ПОТОКУ ГАЗУ З ЩІЛЬНИМ РУХОМИМ ШАРОМ ГРАНУЛЬОВАНОГО МАТЕРІАЛУ

Бошкова І.Л., Волгушева Н.В., Солодка А.В., Бошков Л.З.
Одеська національна академія харчових технологій
вул. Дворянська, 1/3, 65082, м. Одеса
boshkova.irina@gmail.com, natvolgusheva@gmail.com,
solodkaya140619@gmail.com, leonidboshkov@i.ua

Дослідження спрямовані на розвиток теплоутилізаторів регенеративного типу з щільним шаром гранульованого матеріалу. Встановлено, що теплоутилізаційні установки контактної типу, для яких характерний безпосередній теплообмін газу (повітря) з шаром часток, мають значний потенціал підвищення ефективності їх використання. В роботі отримані дані за теплообміном між наскрізним газовим потоком та щільним рухомим шаром керамзиту та гравію при температурних напорах, що характерні для підприємств з низьким рівнем температурних викидів. Рациональні режимні параметри теплоутилізаторів контактної типу характеризуються швидкістю нагрівання та інтенсивністю теплообміну. Для визначення швидкості нагрівання та коефіцієнтів міжкомпонентного теплообміну проведені експериментальні дослідження теплообміну між потоком нагрітого повітря та рухомим шаром матеріалу. Дослідження проводились з щільним шаром керамзиту та гравію. Загалом керамзит нагрівається інтенсивніше гравію при однакових умовах. Визначений характер зміни температури матеріалів на виході з робочої камери залежно від швидкості фільтрації нагрітого повітря. Вплив температури на значення коефіцієнту міжкомпонентного теплообміну для керамзиту в досліджуваному діапазоні температур незначний, а для гравію більш суттєвий. При теплообміні в умовах руху шару тривалість встановлення регулярного режиму нагріву значно менше для керамзиту, ніж для гравію при тому ж самому об'ємі матеріалу. У роботі встановлено, що інтенсивність теплообміну для рухомого шару зростає з підвищенням швидкості руху матеріалу, що пояснюється неможливістю розрідження шару у стінок каналу внаслідок встановлення стрижнеподібної форми руху часток в діапазоні швидкостях, що досліджувались. Встановлено, що в якості матеріалу для гранульованої насадки в більшості випадків доцільно використовувати керамзит. *Ключові слова:* теплоутилізатор, темп нагрівання, коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну, гравій, керамзит, повітря.

Study of the heat exchange of a gas flow with a dense layer of moving granulated material. Boshkova I.L., Volgusheva N.V., Solodka A.V., Boshkov L.Z. The research is aimed at the development of heat exchanger of regenerative type with a dense layer of granular material. It has been established that heat-recovery installations of contact type, for which the direct heat exchange of gas (air) with a layer of particles is characteristic, have considerable potential for increasing the efficiency of their use. In this paper, data are obtained for the heat exchange between the through gas flow and the dense moving layer of claydite and gravel at the temperature headings that are characteristic for enterprises with low level of thermal emissions. Rational regime parameters of heat-recovery devices of the contact type are characterized by the rate of heating and the intensity of heat transfer. To determine the heating rate and coefficients of inter-component heat transfer, experimental studies of heat transfer between the flow of heated air and the moving material layer have been carried out. Studies were conducted with a dense layer of claydite and gravel. It was found that claydite heats up more intensively than gravel under the same conditions. The character of the temperature change of the materials at the output from the working chamber depending on the rate of filtration of the heated air is determined. The effect of temperature on the value of the coefficient of intercomponent heat transfer for claydite in the studied temperature range is insignificant, and for gravel it is more significant. In the case of heat exchange in the conditions of the motion of the layer, the duration of the establishment of the regular heating regime is much less for a claydite than for gravel with the same volume of material. In the work it is established that the intensity of heat transfer for a moving layer increases with the increase in the velocity of the material, which is explained by the impossibility of expansion the layer at the walls of the channel due to the establishment of a rod-shaped particles motion in the range of investigated velocities. It has been established that as a material for granular filling, in most cases it is advisable to use expanded claydite. Key words: heat exchanger, heating rate, inter-component heat exchange coefficient, gravel, claydite, air.

Постановка проблеми. В ході більшості технологічних процесів спостерігається неповне використання первинної енергії. Перспективи утилізації вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) надають можливість отримання значної економії палива та істотно знизити капітальні витрати на створення відповідних енергозберігаючих установок. Визначення рациональних режимних параметрів роботи тепло-

утилізаторів також залежить від надійних даних для коефіцієнтів міжкомпонентного теплообміну, для отримання яких потрібні додаткові експериментальні дослідження.

Актуальність дослідження. Теплоутилізаційні установки контактної типу, для яких характерний безпосередній теплообмін газу (повітря) з шаром часток, мають значний потенціал підвищення ефек-

тивності їх використання. Виникає можливість створювати розвинену поверхню нагрівання у вигляді безупинно рухливих, спеціально обраних часток. Однак, для промислового впровадження недостатньо надійних даних з теплообміну між щільним шаром часток і газом. видається доцільним застосування теплоутилізаторів із гранульованою насадкою на виробництвах, які характеризуються відносно невисоким температурним рівнем відхідних газів, тому визначення умов інтенсифікації процесу теплообміну у теплоутилізаторах із гранульованою насадкою є актуальним науковим і технологічним завданням у сучасних умовах розвитку енергетики та економіки.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Напрямок досліджень безпосередньо пов'язаний із визначальною проблемою енергозбереження, а також з потребою в забезпеченні громадян якісними продуктами в достатній кількості. Роботи відповідають Закону України «Про енергозбереження», затвердженого Постановою Верховної Ради України № 74/94 01.07.1994 р.; а також «Основних положень енергетичної стратегії України на період до 2030 р.», прийнятих Кабінетом Міністрів України 15.03.2006 р.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перенесення теплоти до частинок від потоку газу, що проходить через шар дисперсного матеріалу, визначає в багатьох випадках швидкість і стійкість процесів, що протікають між твердим і газовим компонентом [1]. Визначальний вплив на теплообмін надає витрата теплоносіїв, тривалість циклу [2; 3], розмір часток і особливості їх укладання [4]. З метою оптимізації процесу в [5] розглядається робота теплообмінників, які використовують насадку з матеріалів різної геометрії: сферичні частинки, кільця, брикети. Розвиток енергозберігаючих методів на основі застосування дисперсних теплоносіїв демонструє свою ефективність також для систем вентиляції [6].

У [7] розглянуто один з варіантів енергозбереження в промисловій та комунальній теплоенергетиці шляхом глибокої утилізації теплоти відхідних з котлів продуктів згорання газоподібного палива.

Витікання різних сипучих матеріалів добре вивчено для умов, які називаються умовами вільного гравітаційного витікання [8; 9]. Щоб представити розмір частки неправильної форми одним показником, найбільш часто використовують «середній розмір» [10]. Однак частинки різного розміру одного продукту, які мають однаковий «середній розмір», можуть проявляти абсолютно різні характеристики. Є багато методів визначення розмірів частинок конкретного матеріалу [11]. Залежності для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі отримані для рухомого і нерухомого щільного шару [12; 13]. Проте в умовах використання низькопотенційних ВЕР в теплоаккумуляторах контактного типу з гранульованою насадкою даних для визначення коефіцієнтів міжкомпо-

нентного теплообміну недостатньо, внаслідок чого існує необхідність проведення експериментальних досліджень.

Мета дослідження. Вибір матеріалу для використання в якості гранульованої насадки в теплоутилізаторах контактного типу і встановлення раціональних режимних параметрів теплообміну.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Використання низькопотенційного тепла має значний енергетичний потенціал, внаслідок чого перетворення (утилізація) теплової енергії в корисну є важливим практичним завданням. Ступінь утилізації теплоти залежить від ефективності теплообмінника. Для проведення теплових конструкторських розрахунків акумуляторів та теплоутилізаторів з гранульованою насадкою в якості проміжного теплоносія та подальшого промислового впровадження недостатньо надійних даних по теплообміну між щільним шаром гранул і газом.

Новизна роботи полягає в отриманні даних за теплообміном між наскрізним газовим потоком та щільним рухомим шаром керамзиту та гравію при температурних напорах, що характерні для підприємств з низьким рівнем температурних викидів.

Методологічне значення полягає в визначенні методики експериментального дослідження теплообміну між щільним рухомим шаром гранульованого матеріалу з наскрізним потоком повітря.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проведені на установці, що містить вертикальну робочу ділянку у вигляді циліндричного каналу, в який завантажувалася гранульований матеріал. При дослідженні теплообміну в щільному рухомому шарі матеріал під дією гравітаційних сил проходив канал, нагріваючись від потоку повітря, що подається збоку каналу через повітропровід безпосередньо над вихідним отвором. Швидкість руху шару регулювалася випускним отвором. Схема експериментальної установки наведена на рис. 1.

В експерименті застосовувалися такі прилади: ваги електронні ТВЕ-0,5-0,01, термопари ТХА (К) (працює разом з мультиметром цифровим М4533/1Ц), анемометр АТТ-1004. При дослідженні застосовувалися керамзит і гравій. Середня швидкість повітря становила 3,5–0,63 м/с – для керамзиту, 3,5–0,5 м/с – для гравію, висота шару 0,40–0,52 м; швидкість руху шару матеріалу: 0,001–0,004 м/с, температура навколишнього середовища змінювалася в діапазоні 28–13° С. Для характеристики насадок і теплообмінного апарату на їх основі використовують такі величини: питома площа поверхні часток в одиниці об'єму шару $\alpha_{\text{шт}}$, м²/м³, насипна щільність матеріалу $\rho_{\text{ш}}$, м³/кг; еквівалентний діаметр часток $\bar{d}_{\text{с}}$, м; порозність шару ε . Для подальших досліджень обрані гравій і керамзит. Для керамзиту $\varepsilon_{\text{к}} = 0,37\text{--}0,42$, для гравію $\varepsilon_{\text{г}} = 0,45$. Правильність оцінки цієї величини має суттєвий вплив на точність розрахунку теплових

і аеродинамічних характеристик процесу роботи регенератора з дисперсною насадкою. Еквівалентний діаметр часток, визначений як середньозважений по поверхні, відповідав $\bar{d}_e = 0,0195$ м для керамзиту та $\bar{d}_e = 0,021$ м для гравію. Характер зміни температури матеріалу залежно від швидкості фільтрації демонструє рис. 2.

Збільшення швидкості фільтрації повітря сприяє інтенсифікації теплообміну, причому для швидкості $w_\phi = 3,5$ м/с під час теплообміну з гравієм практично встановлювався стаціонарний режим нагрівання через 330–360 с, а значення температури матеріалу відповідало $t \approx 55^\circ\text{C}$. За використання керамзиту в якості гранульованої насадки стаціонарний режим встановлювався протягом 80 с ($w_\phi = 1,2$ м/с) і 120 с ($w_\phi = 0,3$ м/с).

На рис. 3 представлені температурні криві для порівняльного аналізу інтенсивності нагрівання гравію та керамзиту.

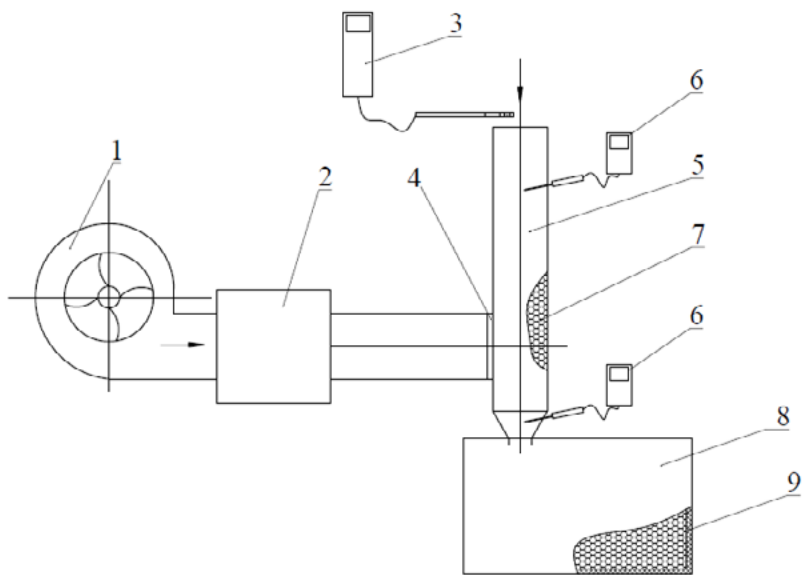


Рис. 1. Установка для експериментального дослідження теплообміну в щільному шарі гранульованого матеріалу:
1 – вентилятор; 2 – нагрівник; 3 – анемометр; 4 – сітка; 5 – робоча камера; 6 – термометр; 7 – гранульований матеріал; 8 – ємність збору гранульованого матеріалу; 9 – ізоляція

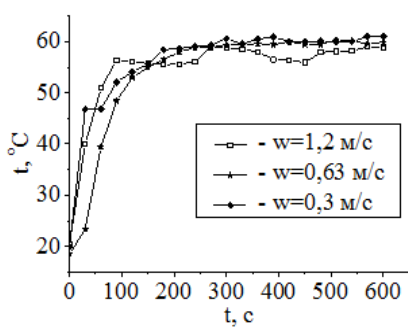
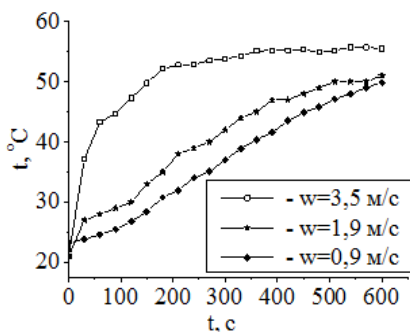


Рис. 2. Температура матеріалу на виході з робочій камери за різної швидкості фільтрації w_ϕ : а – гравій, б – керамзит

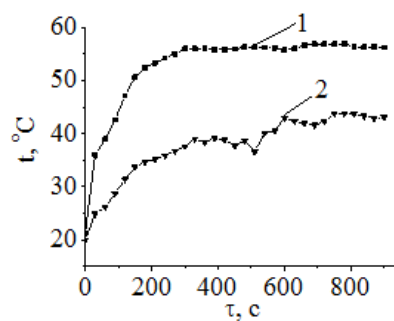


Рис. 3. Зміна температур керамзиту та гравію за часом:
1 – керамзит; 2 – гравій

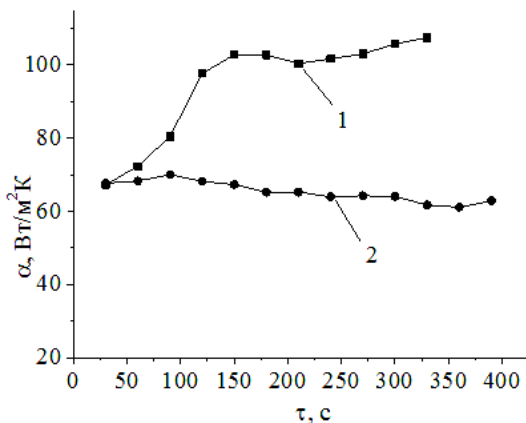
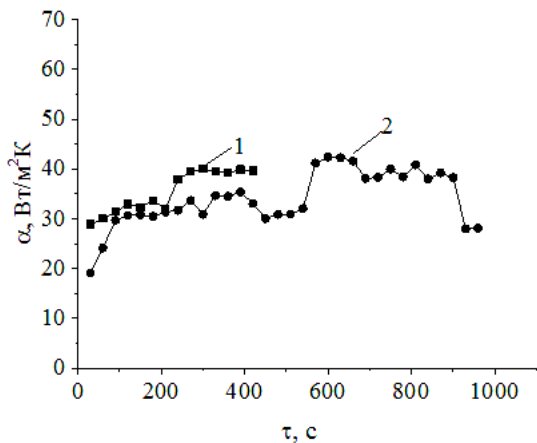


Рис. 4. Зміна $\bar{\alpha}_m$ за часом для рухомого шару керамзиту (а) та гравію (б)
 $1 - t_n' = 80^\circ\text{C}$; $2 - t_n' = 60^\circ\text{C}$; $G_n = 0,0113$ кг/с.

Видно, що керамзит нагрівається інтенсивніше гравію, що пояснюється різними фізичними властивостями – теплоємністю та щільністю матеріалу.

Вплив температури на значення коефіцієнту міжкомпонентного теплообміну $\bar{\alpha}_m$ для керамзиту в досліджуваному діапазоні температур незначний, що демонструється графіком (рис. 4). Для гравію вплив температури виявився більш явний [14].

При теплообміні в умовах руху шару тривалість встановлення регулярного режиму нагріву значно менше для керамзиту, ніж для гравію при тому ж самому об'ємі матеріалу. При порівнянних швидкостях руху шару гравію та керамзиту інтенсивність нагрівання суттєво вище для керамзиту. При швидкості руху керамзиту $w_m = 1,6 \cdot 10^{-3}$ м/с та висоті каналу 0,4 м шар нагрівається на 36°C. Тривалість проходження каналу складала 250 с. Темп нагрівання 0,14 К/с. При швидкості руху гравію $w_m = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м/с шар, проходячи канал висотою 0,4 м, нагрівається на 23°C. Тривалість проходження каналу складала 288 с. Темп нагрівання становить 0,08 К/с. Характер зміни теплоти в часі слід урахувати при оцінці тривалості періоду нагрівання в теплообмінному апараті при проектуванні.

У роботі встановлено, що інтенсивність теплообміну для рухомого шару зростає з підвищенням

швидкості руху матеріалу, що пояснюється неможливістю розрідження шару у стінок каналу внаслідок встановлення стрижнеподібної форми руху часток в діапазоні швидкостях, що досліджувались. При подальшому збільшенні швидкості спостерігається розрідження матеріалу у стінок каналу, зростання порозності в цій області та зниження інтенсивності теплообміну.

Головні висновки. На підставі аналізу результатів досліджень встановлено, що в якості матеріалу для гранульованої насадки доцільно використовувати керамзит, який у порівнянні з гравієм має високий темп нагрівання, відносно низьке значення щільності (щільність керамзиту $\rho_k = 825 - 950$ кг/м³, щільність гравію $\rho_{gp} = 1930$ кг/м³) та доступну вартість. При використанні керамзиту раціональному режиму відповідають наступні параметри процесу теплообміну: витрата повітря 0,0113 кг/с, температура повітря на вході 80°C, швидкість руху матеріалу $1,6 \cdot 10^{-3}$ м/с, темп нагрівання 0,14 К/с.

Перспективи використання результатів досліджень. Результати досліджень доцільно використовувати при проектуванні теплоакумуляторів у вигляді регенеративних теплообмінників з гранульованими насадками та подальшого впровадження їх у виробництво.

Література

- Ding Y., He Y., Cong N. T., Yang W., Chen H. Hydrodynamics and heat transfer of gas–solid two-phase mixtures flowing through packed beds – a review. *Progress in Natural Science*. 2008. Vol. 18. P. 1185–1196.
- 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*. (11–13 July 2016 Costa de Sol, Spain). Costa de Sol. 2016. P. 183–187.
- Snider D. M., Dale M. S. Three fundamental granular flow experiments and CPFD predictions. *Power Technology*. 2007. Vol. 176. P. 36–46.
- Bohuslav K., Zdeněk J. Preliminary Design and Analysis of regenerative heat exchanger. *Chemical engineering transactions*. 2016. V. 52. P. 655–660.
- Wołkowycki G. Experimental Results on the Fixed Matrix Regenerator Effectiveness for a Glass Stove Furnace. *Heat Transfer Engineering*. 2016. V. 37. P. 591–602.
- 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. Vol. 58. P. 619–645.
- Ефимов А.В., Гочаренко А.Л., Касилов О.В., Гончаренко Л.В. Выбор оптимальных параметров теплоносителей при разработке системы глубокой утилизации теплоты уходящих из котельных агрегатов газов. *Энергосбережение*. 2014. Т. 3, № 121. С. 1–10.
- Goldhirsch I. Rapid granular flows. *Fluid Mechanics*. 2003. V. 35. P. 267–293.
- Шваб А.В., Марценко М.С. Исследование движения плотного слоя гранулированной среды и процесса смешения в сужающемся канале. *Математика и механика*. 2010. Т. 12, № 4 С. 123–130.
- Гаврилова Н.Н., Назаров В.В., Яровая О.В. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов. Москва. 2012. 52 с.
- Arouca F.O., Barrozo M.A.S., Damasceno J.J.R. Analysis of techniques for measurement of the size distribution of solid particles. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2005. V. 22, № 1. P. 135–142
- 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. Vol. 29, № 2. P. 151–162.
- Juan Y., Zhang M., Fan W., Zhou Y., Zhao G. Study on performance of the ball packed-bed regenerator: experiments and simulation. *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 69. P. 113–122.
- Солодка А.В. Изучение процессов теплопереноса в теплообменнике с гранулированной насадкой. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса. 2017. № 2(80). С. 116–121.