

Романько Я.В., Мешкова А.Г., Гупало О.В.

**Дослідження роботи компактного регенератора
з різними насадками**

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна

Romanko Y.V., Meshkova A.G., Gupalo O.V.

Study of the operation of a compact regenerator with different nozzles

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

Анотація. Об'єкт дослідження – процеси теплообміну в робочому просторі насадки високотемпературного компактного регенеративного теплообмінника в димовий та повітряний періоди.**Мета дослідження** – визначення впливу характеристик різних теплоакumuлюючих насадок регенератора на теплову ефективність його роботи та визначення робочих характеристик регенератора при комбінуванні насадок різних типів. За допомогою математичної моделі досліджено роботу компактного регенеративного теплообмінника з різними типами насадок в умовах використанні його сумісно з пальником в системі опалення високотемпературного теплотехнічного агрегата. Виконані розрахунки роботи регенератора з кульковою насадкою, зі стільниковою насадкою і з насадкою, що складається з шару куль і пористих керамічних блоків.**Ключові слова:** регенератор, насадка, теплообмін, теплообмінник, математичне моделювання.**Abstract.** The object of the study is the heat exchange processes in the working space of the nozzle of a high-temperature compact regenerative heat exchanger in the smoke and air periods. The purpose of the study is to determine the influence of the characteristics of various heat-accumulating nozzles of the regenerator on the thermal efficiency of its operation and to determine the operating characteristics of the regenerator when combining nozzles of different types. Using a mathematical model, the operation of a compact regenerative heat exchanger with different types of nozzles was investigated under the conditions of its use together with a burner in the heating system of a high-temperature heat-technical unit. Calculations of the operation of the regenerator with a ball nozzle, with a honeycomb nozzle and with a nozzle consisting of a layer of balls and porous ceramic blocks were performed.**Key words:** regenerator, nozzle, heat exchange, heat exchanger, mathematical modelling.

Вступ. Застосування регенеративних пальників у печах різного типу дозволяє за рахунок глибокої утилізації тепла димових газів досягти значної економії палива. Невід'ємною частиною даного пристрою є компактний регенератор.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. В якості насадки такого регенератора добре себе зарекомендували керамічні кульки [1]. Кулькова насадка легко очищається від забруднень, має високу стійкість до температурних перепадів, тому її можна багаторазово використовувати. Однак шар куль має великий гідравлічний опір, що вимагає додаткової тяги.

В даний час набувають поширення регенеративні пальники з керамічною стільниковою насадкою [2]. Така насадка має більш розвинену поверхню порівняно з кульковою. Її використання дає більш високу температуру підігріву повітря У той же час через малі розміри осередків стільникова насадка схильна до забруднень різними відкладеннями, що виносять дим. Очищення такої насадки утруднене, тому що розміри комірок не перевищують 2-3 мм (рис. 1). Підвищена крихкість

тонкостінної кераміки також перешкоджає багаторазовому використанню стільникової насадки [3].

Для зменшення цих недоліків можливе застосування комбінованої насадки, що складається частково з шару куль і пористих керамічних блоків (рис. 2). Для дослідження порівняльних характеристик таких насадок було проведено математичне моделювання.

Методи дослідження. За основу була прийнята модель теплообміну в регенераторі з кульковою насадкою [4]. При цьому кожна частина комбінованої насадки розглядалася як однорідне середовище з постійною порізністю, а теплообмін випромінюванням між частинками насадки був замінений ефективною теплопровідністю.

Теплова робота насадки складається з багаторазово повторюваних димового і повітряного циклів. Математична постановка задачі наведена нижче.

Для димового періоду:

- диференціальне рівняння теплообміну для шару:

$$\rho(1 - \varepsilon)C \frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha_{VD}(t_d - t) + \lambda_{ef} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (1)$$



- диференціальне рівняння теплообміну для диму:

$$-W_{д0}C_{д}\frac{\partial t_{д}}{\partial x} = \alpha_{V_{д}}(t - t_{д}), \quad (2)$$

початкові умови:

$$t(x, 0) = t_{0c}, \quad (3)$$

- граничні умови:

$$t_{д}(h, \tau) = t_{д0}. \quad (4)$$

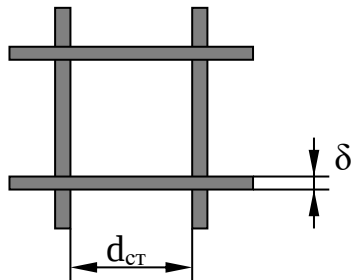
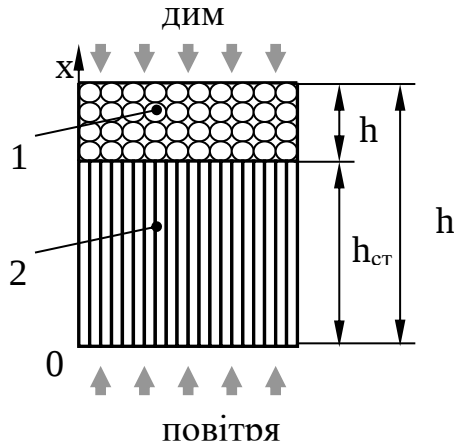


Рисунок 1. Комірка стільникової насадки



1 – кулькова насадка;
2 – стільникова насадка

Рисунок 2. Схема регенератора з комбінованою насадкою

Для повітряного періоду:

- диференціальне рівняння теплообміну для шару:

$$\rho(1 - \varepsilon)C \frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha_{V_{п}}(t_{п} - t) + \lambda_{еф} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (5)$$

- диференціальне рівняння теплообміну для повітря

$$W_{п0}C_{п} \frac{\partial t_{п}}{\partial x} = \alpha_{V_{п}}(t - t_{п}), \quad (6)$$

- граничні умови:

$$t_{п}(0, \tau) = t_{п0}, \quad (7)$$

де ρ – щільність матеріалу насадки;

ε – порізність насадки;

C – питома теплоємність матеріалу насадки;

t – температура шару;

τ – час;

$\alpha_{V_{д}}$ – об'ємний коефіцієнт тепловіддачі диму;

$t_{д}(x, \tau)$ – температура диму за висотою шару;

$\lambda_{еф}$ – ефективна теплопровідність шару;

$W_{д0}$ – швидкість диму;

$C_{д}$ – теплоємність диму;

h – висота регенератора;

$t_{д0}$ – початкова температура диму;

$\alpha_{V_{п}}$ – об'ємний коефіцієнт тепловіддачі повітря;

$t_{п}(x, \tau)$ – температура повітря за висотою шару;

$W_{п0}$ – швидкість повітря;

$C_{п}$ – теплоємність повітря;

$t_{п0}$ – початкова температура повітря.

Об'ємний коефіцієнт тепловіддачі диму та повітря для шару куль визначається з урахуванням їхньої масивності.

Для диму:

$$\alpha_{V_{д}} = \frac{\alpha_{F_{д}}}{1 + \frac{Bi}{5}} \cdot \frac{6(1 - \varepsilon)}{d_{к}}, \quad (8)$$

де $\alpha_{F_{д}}$ – поверхневий коефіцієнт тепловіддачі диму;

Bi – число Біо.

$$\alpha_{F_{д}} = \frac{Nu \cdot \lambda_{д}}{d_{к}}, \quad (9)$$

де Nu – число Нусельта;

$\lambda_{д}$ – теплопровідність диму;

$d_{ш}$ – діаметр кульок.

Критерій Нуссельта визначається за формулою[5]:

$$Nu = 0,61 \cdot Re^{0,67}, \quad (10)$$

де Re – число Рейнольдса,

$$Re = (W_{д} \cdot d_{к}) / \nu_{д}, \quad (11)$$

$\nu_{д}$ – в'язкість диму.

$$Bi = \frac{\alpha_{F_{д}} \cdot d_{к}}{\lambda_{к}}, \quad (12)$$

$\lambda_{к}$ – теплопровідність кульок.

Аналогічно розраховується коефіцієнт тепловіддачі для повітря з тією відмінністю, що всі параметри беруться для повітря.

Об'ємний коефіцієнт тепловіддачі диму та повітря для стільникової насадки визначається наступним чином.

Для диму:

$$\alpha_{V_d} = \alpha_{F_d} \cdot \frac{4}{d_{ст}}, \quad (13)$$

де $d_{ст}$ – розмір комірки стільникової насадки.

$$\alpha_{F_d} = \frac{Nu \cdot \lambda_d}{d_{ст}}. \quad (14)$$

Для розвиненої ламінарної течії в каналах значення критерію Нуссельта можна прийняти рівним 3,66 [6].

Для насадок враховуємо перенесення тепла між ділянками шару. Цей процес можна приблизно замінити ефективною теплопровідністю, яка визначається в залежності від типу насадки.

Для кулькової насадки радіаційна провідність може бути знайдена за формулою [7]:

$$\lambda_{эф} = 4 \cdot f \cdot \sigma_0 \cdot d_k (t + 273)^3, \quad (17)$$

де f – параметр, який залежить від розміру, розташування та властивостей поверхні куль.

Гідрравлічний опір насадки в залежності від її типу визначається такти чином [8].

Для стільникової насадки в димовий період:

$$\Delta P_{ст} = k \frac{h_{ст} \cdot \rho_d \cdot W_d^2}{d_{ст}}, \quad (18)$$

$$\text{де } k = \frac{64}{Re}. \quad (19)$$

Для кулькової насадки у димовий період

$$\Delta P_k = k \frac{h_k \cdot \rho_d \cdot W_d^2}{d_k}, \quad (20)$$

$$\text{де } k = \frac{1,53}{\omega^{4,2}} \left(\frac{30}{Re^{0,7}} \right), \quad (21)$$

$$Re = \frac{0,45}{(1-\omega)\sqrt{\omega}} \cdot \frac{W_d \cdot d_k}{\nu_d}, \quad (22)$$

де ω – параметр, що залежить від взаємного розташування куль. Для рівномірного пакування

$\omega \approx 0,259$.

Система диференціальних рівнянь 1 – 7 вирішується методом кінцевих різниць за неявною схемою.

Результати дослідження. За допомогою розглянутої вище математичної моделі були проведені дослідження роботи теплообмінника для регенеративного пальника потужністю 270 кВт, що працює на природному газі з теплотою згорання $\approx 35,5$ МДж/м³, за наступних вихідних даних. Насадка регенератора складається з кульок діаметром $d_k = 0,02$ м; розмір комірки стільникової насадки $d_{ст} = 0,0025$ м; насадки виготовлені з корунду; початкова температура насадки $t_0 = 0$ °С; висота регенератора $h = 0,4$ м; початкова температура диму $t_{д0} = 1000$ °С; початкова температура повітря $t_{пов0} = 0$ °С; швидкість диму та повітря $W_d = W_{пов} = 0,6$; тривалість одного димового або повітряного періоду $t_{ц} = 30$ с.

Виконані розрахунки температури підігріву повітря в регенераторі з кульковою та стільниковою насадкою з різними розмірами кульок та стільників (рис. 3). Для цих випадків розраховані гідрравлічні опори (рис. 4).

При збільшенні визначального розміру від $d_k = 2,5$ мм до $d_k = 20$ мм температура підігріву повітря в кульковій насадці знижується з $t_{пов} = 908$ °С до $t_{пов} = 765$ °С. Для стільникової насадки при цьому температура підігріву повітря падає більш значно і становить $t_{пов} = 870$ °С при $d_{ст} = 2,5$ мм до $t_{пов} = 356$ °С при $d_{ст} = 20$ мм. Однак при цьому гідрравлічний опір регенератора з кульковою насадкою на порядок вищий, ніж стільниковий.

Розігрів насадки до початку роботи у стаціонарному режимі зайняв за розрахунком 45 хвилин. Усі подальші результати наведені до роботи регенератора в стаціонарному режимі.

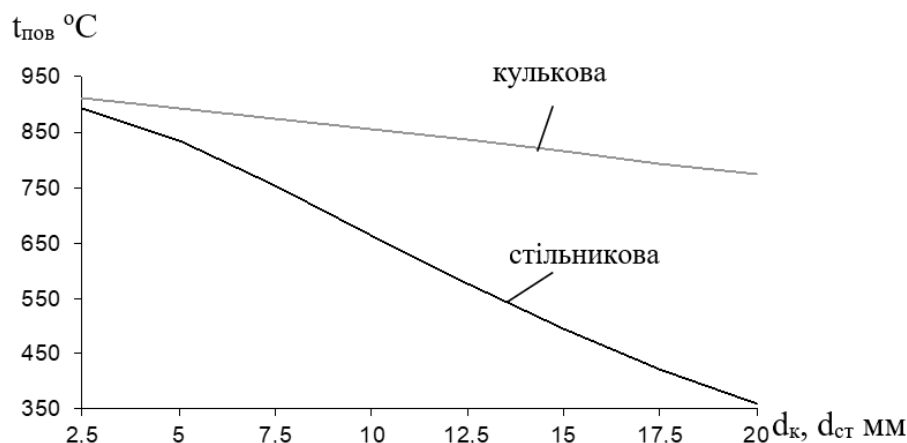


Рисунок 3. Температура підігріву повітря в кульковій та стільниковій насадках залежно від розміру кульки d_k та комірки $d_{ст}$

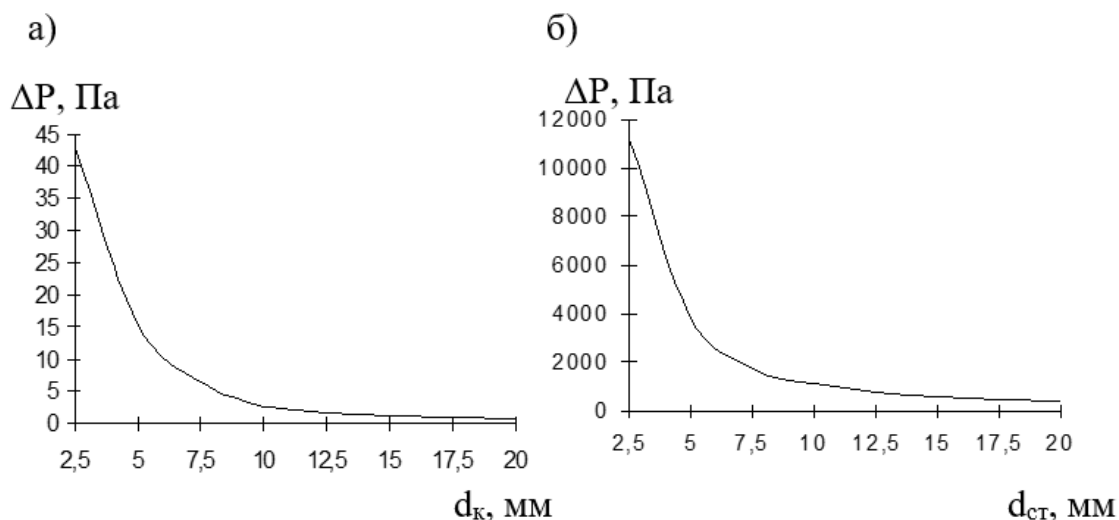


Рисунок 4. Зміна гідравлічного опору кулькової (а) та стільникової (б) насадок залежно від розміру кульок d_k і комірок d_{ct}

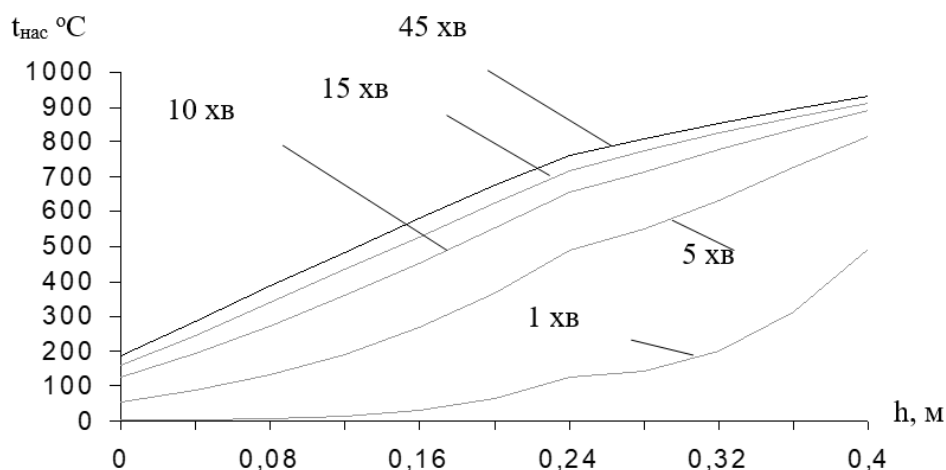


Рисунок 5. Розподіл температури насадки по висоті в різний момент часу

На рис.5 зображено графік розподілу температури насадки наприкінці димового періоду через 1, 5, 10, 15, 45 хвилин після початку роботи регенератора. З рис.5 видно, що протягом інерційного періоду при кожному наступному циклі швидкість розігріву насадки значно знижується. Коли насадка розігріта до стаціонарного стану, розподіл

температури за висотою регенератора для кожної частини насадки носить лінійний характер.

На рис. 6 зображено графік розподілу температури диму та повітря по висоті регенератора при $h_{ct}/h=0,6$. На рис.7 показано зміну температури підігріву повітря залежно від відношення h_{ct}/h для регенераторів різної довжини.

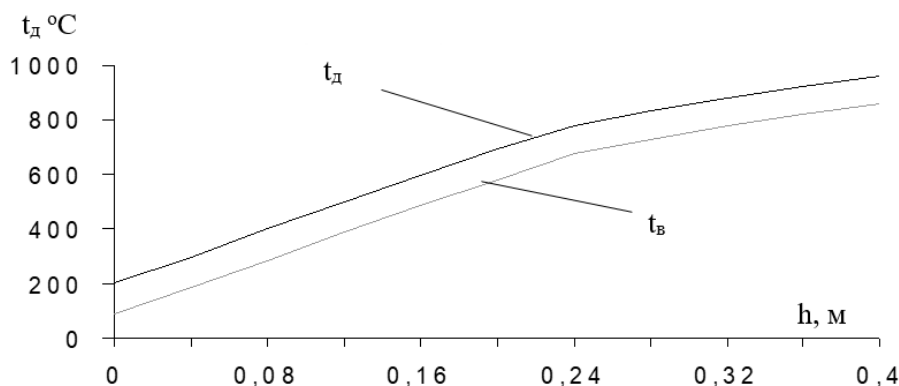


Рисунок 6. Зміна температури диму і повітря по висоті регенератора при $h_{cm}/h=0,6$

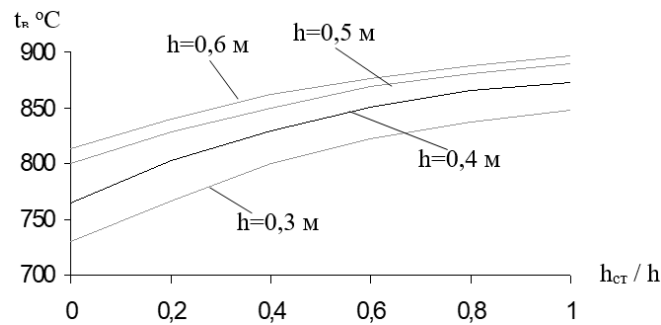


Рисунок 7. Зміна температури підігріву повітря в залежності від співвідношення h_{ct}/h .

Гідрравлічний опір стільникової насадки при тому самому визначальному розмірі на порядок нижче кулькової. Це дає можливість застосовувати на практиці пористі керамічні блоки з розміром комірки 2-3 мм. Заміна кулькової насадки на стільникову дозволить підвищити температуру підігріву повітря приблизно на 100°C.

Комбінована насадка займає проміжне місце за ефективністю між стільниковою та кульковою. Вибір оптимального співвідношення між елементами комбінованої насадки залежить від експлуатаційних умов роботи регенератора.

Перелік посилань

1. Ганжа. А. И., Заец Е. Н. Анализ эффективности теплообменников-утилизаторов теплоты энерготехнологических комплексов и агрегатов. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2016. №10 (1182). С. 56-60.
2. Toshiaki Hasegawa, Sumiyuki Kishimoto and Yutaka Suzukawa. Environmentally-compatible Regenerative Combustion Heating System. The Second International Seminar on High Temperature Combustion in Stockholm, Sweden, Royal Institute of Technology, 17-18 January 2000.
3. Poo Min Park, Han Chang Cho and Hyun Dong Shin. Unsteady thermal flow analysis in a heat regenerator with spherical particles. *Int. J. Energy Research*. 2003; 27.- pp.161–172.
4. Экспериментальное исследование тепловых характеристик высокотемпературного теплообменника с плотным слоем шариковой насадки. // Есикава и др. Труды ASME, серия С, Теплопередача, 1985, №3, с. 198-202.
5. Исследование работы шарикового регенератора для регенеративных горелок.// Розенгарт Ю.И.; Шевченко Г.Л.; Губинский М.В. и др. Сборн. научн. тр. *Металлургическая теплотехника*. Т.1, Днепропетровск: ГМетАУ, 1999.- с. 150–153.
6. Т. Себиси, П. Бредшоу. Конвективный теплообмен. М. «Мир». 1987. – 590 с.
7. Расчет теплообмена излучением в слое случайно упакованных шаров методом Монте-Карло.//Ян; Хауэлл; Клейн. Труды ASME, серия С, Теплопередача, № 2, 1983.- с. 112–119.
8. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М. Машиностроение. 1975.- 570 с.

Reference

1. Hanzha, A. Y., & Zaets, E. N. (2016). Analiz efektyvnosti teploobmennikov-utylyzatorov teploti enerhotekhnologicheskyykh kompleksov y ahrehatov. *Visnyk NTU "KhPI"*, 10(1182), 56-60.
2. Toshiaki H., Sumiyuki K., & Yutaka Suzukawa. (2000). Environmentally-compatible Regenerative Combustion Heating System. The Second International Seminar on High Temperature Combustion in Stockholm, Sweden, Royal Institute of Technology, 17-18 January 2000.
3. Poo M. P., Han, C. C., & Hyun, D. S. (2003). Unsteady thermal flow analysis in a heat regenerator with spherical particles. *Int. J. Energy Research*, 27, 161-172.
4. Esikava et al. (1985). Trudy ASME, seriia S. *Teploperedacha*, (3), 198-202.
5. Rozengart, Iu. I., Shevchenko, G. L., & Gubinski, M. V. et al. (1999). *Issledovanie raboty sharikovogo regeneratora dlia regenerativnykh gorelok. Sborn. nauchn. tr. Metallurgicheskaya teplo tekhnika*. T.1.
6. Sebisi, T., & Bredshou, P. (1987). Konvektivnyi teploobmen. "Mir".
7. Ian, Khauell, & Klein. (1983). Raschet teploobmena izlucheniem v sloe sluchaino upakovannykh sharov metodom Monte-Karlo. *Trudy ASME, seriia S, Teploperedacha*, (2), 112-119.
8. Ydelchik, Y. E. (1975). Spravochnyk po hydravlycheskym soprotivleniyam.. Mashynostroenye.

Надіслано до редакції / Received: 17.08.2025

Прийнято до друку / Accepted: 08.12.2025