

Кошельник О.В.^{1,2}, к.техн.н., доцент, Гойсан С.Б.², аспірант

ПЕРСПЕКТИВНІ ТИПИ НАСАДОК РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ СКЛОВАРНИХ ПЕЧЕЙ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків

²Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

Ключові слова: скловарна піч, утилізація теплоти димових газів, регенеративні теплообмінники, насадка регенераторів, ефективність.

Вступ. На початку ХІХ століття сформувався новий етап в розвитку скловаріння, внаслідок розробки і впровадження принципу регенерації теплоти димових газів німецьким інженером Фрідріхом Сіменсом. При детальному дослідженні було виявлено, що така схема дозволяла нагріти необхідну кількість холодного повітря гарячими димовими газами, що зменшувало витрату палива в печі та значно підвищувала температуру в ній [1, 2]. Первинне використання регенераторів в печах було здійснене на горшкових печах, а пізніше – у печах ванного типу. Ванні регенеративні печі виявились більш економічними аніж горшкові не тільки із-за кращого використання палива, а й внаслідок безперервного виробництва скла. Проте така конструкція також має свої недоліки [3, 4].

Виділення невирішеної частини загальної проблеми. Вчені-теплотехніки загалом працювали над покращенням конструкції насадки регенераторів печі, більшість із них досліджені, оптимізовані та знайшли своє використання на практиці. В більшості ці рішення стосуються збільшення або зміни площі та форм насадок, що в деяких реальних установках неможливо здійснити, а питання по збільшенні ефективності регенератора скловарної печі без зміни габаритних розмірів залишається досить актуальним [5, 6]. Тому вирішення даного питання може суттєво збільшити ефективність роботи печі в цілому.

Викладення основної частини дослідження. Регенераторами називають спеціальні теплообмінні камери, всередині яких знаходиться вогнетривка теплообмінна насадка. Головна конструктивна відмінність регенератора від рекуператора полягає у тому, що теплообмін відбувається не через розділову стінку, а через спеціальну насадку. За деякий період часу до насадки надходить одна із двох середовищ – те, що нагрівається, або ж те, що гріє. В залежності від типу печі, її конструкції, виду палива, продуктивності та інших критерії конструктивно розрізняють вертикальні та горизонтальні регенератори. Вертикальні регенератори отримали найбільше використання в силу меншого аеродинамічного опору та відносно невеликого забруднення насадки (рис. 1) [4].

Насадки регенераторів зазвичай виконують із вогнетривких матеріалів, переважно шамоту, високоглиноземистої та термостійкої магнезитової цегли. При виробництві окремих видів скла, вибір вогнетривів здійснюється, виходячи з циклічності використання, а також конкретних робочих температур. Так, при виробництві боросилікатного скла, прийнято застосовувати корунд-цирконієві та циркономулітові матеріали. Також інколи можна зустріти спеціальні види вогнетривких матеріалів, які розроблені для регенераторів промислових печей, наприклад високотермостійкі періклазові, періклазоцирконієві та перікло-форстеритоцирконієві вогнетриви, що використовуються при температурах 1400–1500 °С та зберігають свої властивості протягом 6–8 років [7, 8].

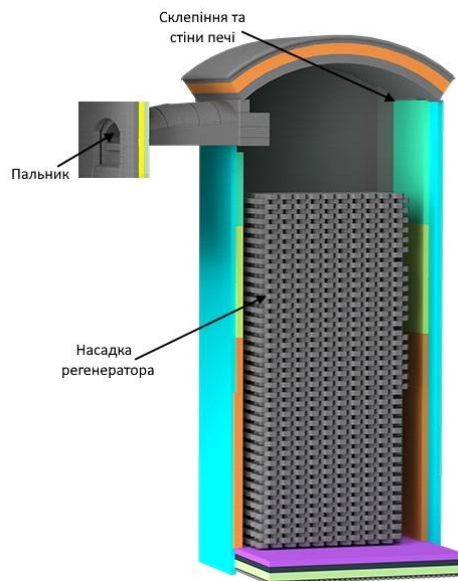


Рисунок 1 – Загальний вид вертикального регенеративного теплообмінника

Насадки регенераторів як правило намагаються викладати з максимальною поверхнею нагріву, що дозволяє отримати найефективніший теплообмін між газами та вогнетривами. В той й же час слід урахувувати опір потоку газів, що проходять по каналах, теплові та міцнісні властивості вогнетривів, а також тип насадки регенератора. На рисунку 2 зображені основні типи насадок регенераторів ванних скловарних печей: Каупера із суцільними каналами (а); незміщена Сіменса з рядами що, чергуються (б); зміщена Сіменса з рядами що, чергуються (в); Ліхте (г, д); з розташуванням цегли, що чергуються (е) [5, 9].

Насадка Каупера виконується таким чином, що цегла утворює суцільні вертикальні канали без мертвого простору між потоком і цеглинами. Окрім позитивних якостей, наприклад, стійкості конструкції а також простоти очищення, основними недоліками є невелика поверхня нагріву (відношення m^2 поверхні, що нагріває, до m^3 насадки), невеликий коефіцієнт теплопереноса. Найбільш оптимальним для підвищення ефективності даних насадок буде використання цегли спеціальної форми в каналах для забезпечення турбулізації потоку, а також застосування цеглини з невеликою товщиною, оскільки із зменшенням товщини збільшується поверхня теплообміну.

Насадка Сіменса викладається в двох варіантах – із зміщеними або незміщеними в шаховому порядку рядами. Насадка із зміщеними рядами має кращу теплопередачу, однак більш схильна до забруднення аніж насадка з незміщеною конструкцією. Найбільш розповсюдженою є насадка із горизонтальними рядами, що чергуються, оскільки при такому виконанні вона має більшу поверхню теплообміну за умов використання стандартної цегли та ширини каналу [3].

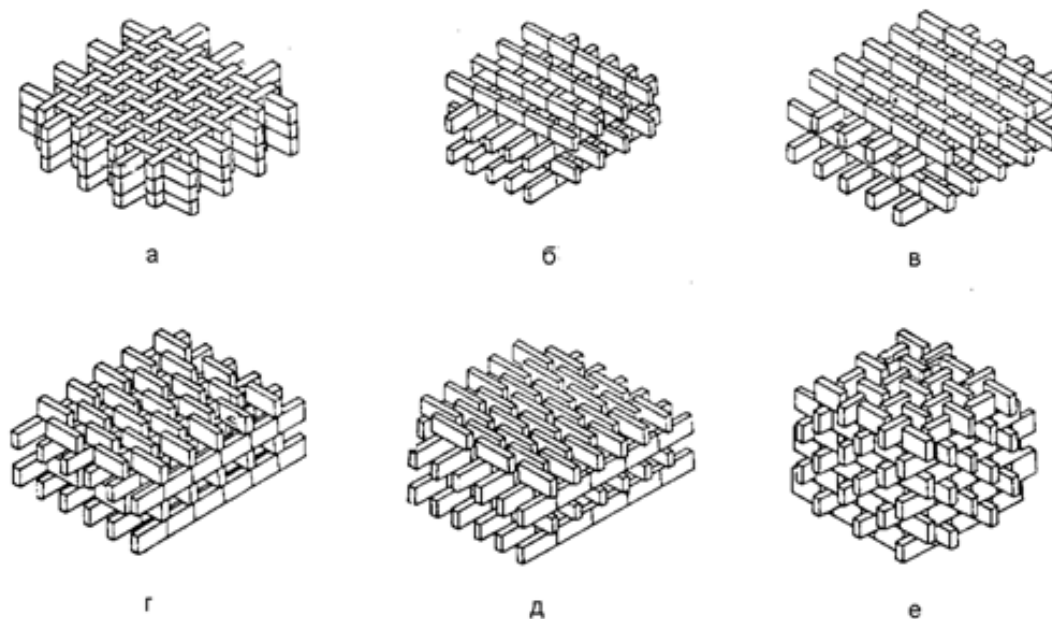


Рисунок 2 – Основні типи насадок регенераторів

Насадка Ліхте має найбільшу ефективність в порівнянні з іншим типами насадок. Дана конструкція виконується з рядами, що чергуються, та цеглинами у розбіг. Перевагою такого виконання є те, що торцеві поверхні цеглин залишаються відкритими, при цьому збільшується площа нагріву за рахунок вертикальних площин. Гази, що проходять один рад, міняють свій напрямок і швидкість, в насадці ж із суцільними каналами ці параметри залишаються без змін.

Насадка з рядами цеглин, що чергуються, або ж комбіновані насадки знайшли своє застосування в печах великої потужності. Такі насадки можуть викладатись як комбінація насадки Каупера (див. рис. 2, а) і насадки Сіменса (див. рис. 2, б, в). Також широке поширення в останній час отримали корзинкові насадки та хрестоподібні насадки з плавнелитих формових елементів [5].

Для всіх названих типів насадок притаманні спільні властивості, які характеризують ефективність та доцільність використання конкретного їх типу:

- прохідний перетин (%), тобто характеристика аеродинамічного опору потоку газів;
- еквівалентна товщина цегли насадки;
- товщина елемента, тобто характеристика стійкості матеріалу насадки;

- поверхня теплообміну (m^2/m^3 об'єму регенеративної камери), тобто характеристика степені заповнення простору камери.

Розглянувши всі аспекти виконання, використання та переваги основних видів насадок, стає зрозумілим, що для збільшення ефективності регенератора скловарної печі, слід розглядати перспективні варіанти виконання. Одним із таких варіантів виконання регенеративної насадки можна розглядати так звані гібридні матеріали на основі «сольової» кераміки [10–12]. В даний час здійснюються дослідження та розвивається виробництво таких насадок із використанням сульфату барію та сульфату натрію ($BaSO_4$, Na_2SO_4) в поєднанні із вогнетривами на основі MgO та SiO_2 (магнезитові, періклазові та ін.) Перші спроби виконання насадок даного типу показали високу стійкість при різноманітних циклічних навантаженнях. Основною перевагою такої насадки є дія прихованої теплоти, що обумовлюється фазовим переходом компонента (солі), тобто така насадка буде отримувати більше теплоти ніж проста насадка таких же габаритів на величину прихованої теплоти фазового переходу солі. В роботі [10] було розглянуто один із основних недоліків та обмежень щодо використання плавких вставок в регенераторах:

- менша стійкість конструкції, за рахунок внутрішніх пустот, що заповнені матеріалом з фазовим переходом;
- ретельний підбір вогнетривів із урахуванням стійкості до агресивних летучих компонентів;
- підбір плавкого матеріалу з добрими показниками «залишкового» тепла і зміни об'єму та щільності під час процесу «плавлення-кристалізація».

Тому ефективним буде використання насадок з таких матеріалів в зонах найбільших перепадів температур, тобто у верхній та нижній частинах регенератора.

Висновки. Таким чином, проаналізувавши сучасні типи насадок регенеративних теплообмінників скловарних печей, можна зробити наступні висновки. Ефективність роботи регенераторів майже неможливо підвищити за рахунок заміни одного типу насадок на іншу без значного збільшення розмірів теплообмінника. Найбільш ефективними типами насадок на сьогодні є насадка Ліхте з вогнетривкої цегли та насадка корзинового типу, виконана з плавнелитих формових елементів. Для подальшого підвищення теплоакумуючих властивостей насадок пропонується використання цегли з плавкими вставками з «сольових» матеріалів, що додатково дозволить використовувати теплоту фазового переходу. Але для забезпечення надійності роботи регенераторів з такими насадками необхідно проведення додаткових досліджень процесів теплообміну та стійкості акумулюючих елементів.

Література

1. Волгина Ю.М. Теплотехническое оборудование стекольных заводов / Ю.М. Волгина. – М. : Стройиздат, 1982. – 276 с.
2. Гинзбург Д.Б. Стекловаренные печи / Д.Б. Гинзбург. – М : Стройиздат, 1967. – 340 с.

3. Булавин И.А. Тепловые процессы в технологии силикатных материалов / И.А. Макаров, А.Я. Рапопорт, В.К. Хохлов. – М. : Стройиздат, 1982. – 243 с.
4. Козлов А.С. Теплотехника регенеративных стекловаренных печей / А.С. Козлов. – М. : Легпромбытиздат, 1990. – 143 с.
5. Интегрированные энергосберегающие теплотехнологии в стекольном производстве : монография / Товажнянский Л.Л., Кошельник В.М., Соловей В.В., Кошельник А.В. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – 628 с.
6. Кошельник А.В. Підвищення енергоефективності регенераторів з нерухомою насадкою полум'яних скловарних печей / А.В. Кошельник, М.Н. Шапранова. – Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 63 (969). – Тем. вип. «Хімія, хімічна технологія та екологія». – С. 54–66.
7. Троянкин Ю.А., Кузьмина И.М. Оптимизация насадки регенераторов ваннных стекловаренных печей / Ю.А.Троянкин, И.М. Кузьмина // Стекло и керамика. – 1997. – № 9. – С. 12–14.
8. Современные строительные материалы. Строительное и техническое стекло (аналитический обзор) / Матвеев Г.М., Миронов В.В., Раскина Э.М., Тарасевич К.А. // Стекло и керамика. – 1998. – № 8. – С. 7–10.
9. Кошельник А.В. Разработка и анализ нейросети для прогнозирования параметров эффективности насадки регенератора стекловаренной печи / А.В. Кошельник, А.А. Мигура // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 6/8 (78). С. 29–33.
10. Zwischenbilanz zur rationellen Energienutzung bei Thermoprozessen, insbesondere Industrieoffen // Workshop in Duesseldorf. – Karlsruhe: Fraunhofer-Institut fuer Systemtechnik und Innovationforschung, 1996. – P. 82–97.
11. Brunklaus H. Industrieofen. Bau und Betrieb / H. Brunklaus. – Essen : Vulkan-Verlag, 1994. – 800 p.
12. Trier W. Glasschmelzofen. Konstruktion und Betriebsverhalten / W. Trier. – Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo: Springer Verlag, 1984. – 338 p.

Bibliography (transliterated)

1. Volgina Yu.M. Teplotekhnicheskoye oborudovaniye stekol'nykh zavodov / Yu.M. Volgina. – М. : Sroyizdat, 1982. – 276 p.
2. Ginzburg D.B. Steklovarennyye pechi / P.B. Ginzburg. – М : Sroyizdat, 1967. – 340 p.
3. Bulavin I.A. Teplovyye protsessy v tekhnologii silikatnykh materialov / I.A. Makarov, A.Ya. Rapoport, V.K. Khokhlov. – М. : Sroyizdat, 1982. – 243 p.
4. Kozlov A.S. Teplotekhnika regenerativnykh steklovarennykh pechey / A.S. Kozlov. – М. : Legprombytizdat, 1990. – 143 p.
5. Integrirovannyye energosberegayushchiye teplotekhnologii v stekol'nom proizvodstve : monografiya / Tovazhnyanskyu L.L., Koshelnik V.M., Solovey V.V., Koshelnik A.V. – Kharkov : NTU «KhPI», 2008. – 628 p.

6. Koshelnik A.V. Pidvyshchennya enerhoefektyvnosti reheneratoriv z nerukhomoyu nasadkoyu polum'yanykh sklovarnykh pechey / A.V. Koshelnik, M.N. Shapranova. – Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2012.

7. Troyankin Yu.A., Kuz'mina I.M. Optimizatsiya nasadki regeneratorev vannykh steklovarenykh pechey / Yu. A.Troyankin, I.M. Kuzmina // Steklo i keramika. – 1997. – № 9. – P. 12–14.

8. Sovremennyye stroitelnyye materialy. Stroitelnoye i tekhnicheskoye steklo (analiticheskiy obzor) / Matveyev G.M., Mironov V.V., Raskina E.M., Tarasevich K.A. // Steklo i keramika. – 1998.– № 8. – P. 7–10.

9. Koshelnik A.V. Razrabotka i analiz neyroseti dlya prognozirovaniya parametrov effektivnosti nasadki regeneratorev steklovarennoy pechi / A.V. Koshelnik, A.A. Migura // Vostochno-yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2015. – № 6/8 (78). P. 29–33.

10. Zwischenbilanz zur rationellen Energienutzung bei Thermoprozessen, insbesondere Industrieoffen // Workshop in Duesseldorf. – Karlsruhe: Fraunhofer-Institut fuer Systemtechnik und Innovationforschung, 1996. – P. 82–97.

11. Brunklaus H. Industrieofen. Bau und Betrieb / H. Brunklaus. – Essen : Vulkan-Verlag, 1994. – 800 p.

12. Trier W. Glasschmelzofen. Konstruktion und Betriebsverhalten / W. Trier. – Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo: Springer Verlag, 1984. – 338 p.

УДК 666.1.031.2: 620.97

Кошельнік О.В., к.техн.н., доцент, Гойсан С.Б., аспірант

ПЕРСПЕКТИВНІ ТИПИ НАСАДОК РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛОБМІННИКІВ СКЛОВАРНИХ ПЕЧЕЙ

У скловарних печах одним із способів підвищення їхньої енергетичної ефективності є використання теплового потенціалу димових газів, що відходять, в утилізаційних теплообмінних пристроях. Величина даних втрат становить 25–40 % від загальної кількості тепла, що надійшло в піч. Вона залежить від таких факторів, як вид палива, конструкція печі та пальникових пристроїв, вид продукції, що виготовляється. Для печей великої потужності найбільш ефективним вважається використання регенеративних теплообмінників з різними видами теплоакумуючої насадки. Проаналізовано існуючі типи насадок регенераторів: насадки Каупера, Сименса двох видів, Ліхте і комбіновані насадки. Ці насадки, що викладають зі стандартної вогнетривкої цегли, на сьогоднішній час уже досить досліджені, успішно впроваджені й широко використовуються в скловарних печах різної конструкції. Також останнім часом набули широкого застосування корзинові насадки й хрестоподібні насадки із плавнелитих формових вогнетривких матеріалів. Подальше збільшення теплової ефективності регенеративних теплообмінників шляхом заміни насадок неможливо без збільшення їхніх габаритів, що не завжди можливо при реконструкції діючих печей. Тому перспективним тут є використання теплоакумуючих елементів з фазовим переходом, де в якості плавкої вста-

вки застосовуються солі металів і їхні суміші. Вони можуть акумулювати додаткову кількість теплоти за рахунок використання теплоти фазового переходу, що дозволить без зміни габаритних і режимних параметрів теплообмінника значно збільшити його теплову потужність. Однак для широкого застосування таких насадок необхідне проведення додаткових досліджень, пов'язаних з моделюванням складних нестационарних теплообмінних процесів у регенераторах і підбора відповідних матеріалів, що задовольняють умовам експлуатації регенеративних теплообмінників скловарних печей.

Ключові слова: скловарна піч, утилізація теплоти димових газів, регенеративні теплообмінники, насадка регенераторів, ефективність.

Кошельник А.В., к.техн.н., доцент, Гойсан С.Б., аспірант

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТИПЫ НАСАДОК РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧЕЙ

В стекловаренных печах одним из способов повышения их энергетической эффективности служит использования теплового потенциала отходящих дымовых газов в утилизационных теплообменных устройствах. Величина данных потерь составляет 25–40 % от общего количества тепла, поступившего в печь. Она зависит от таких факторов, как вид топлива, конструкция печи и горелочных устройств, вид изготавливаемой продукции. Для печей большой мощности наиболее эффективным считается использование регенеративных теплообменников с различными видами теплоаккумулирующей насадки. Проанализированы существующие типы насадок регенераторов: насадки Каупера, Сименса двух видов, Лихте и комбинированные насадки. Эти насадки, выкладываемые из стандартного огнеупорного кирпича, на сегодняшнее время уже достаточно исследованы, успешно внедрены и широко используются в стекловаренных печах различной конструкции. Также в последнее время получили широкое применение корзиночные насадки и крестообразные насадки из плавнелитых формовых огнеупорных материалов. Дальнейшее увеличение тепловой эффективности регенеративных теплообменников путем замены насадок невозможно без увеличения их габаритов, что не всегда возможно при реконструкции действующих печей. Поэтому перспективным здесь является использование теплоаккумулирующих элементы с фазовым переходом, где в качестве плавкой вставки применяются соли металлов и их смеси. Они могут аккумулировать дополнительное количество теплоты за счет использования теплоты фазового перехода, что позволит без изменения габаритных и режимных параметров теплообменника значительно увеличить его тепловую мощность. Однако для широкого применения таких насадок необходимо проведение дополнительных исследований, связанных с моделированием сложных нестационарных теплообменных процессов в регенераторах и подбора соответствующих материалов, удовлетворяющим условиям эксплуатации регенеративных теплообменников стекловаренных печей.

Ключевые слова: стекловаренная печь, утилизация теплоты дымовых газов, регенеративные теплообменники, насадки регенераторов, эффективность.

Koshelnik O., Hoisan S.

**ADVANCED TYPES OF CHECKERWORK OF REGENERATIVE
HEAT EXCHANGERS FOR GLASS FURNACES**

One of the ways to increase glass furnaces energy efficiency is to apply heat exchangers for flue gases thermal potential utilization.

Flue gases losses is up to 25-40 % of the total amount of heat supplied in the furnace. These losses are influenced by such factors as fuel type, furnace and burners design and manufactured product type.

Regenerative heat exchangers with various types of heat storage packing is more efficient for high-power furnaces.

Such types of regenerator checkerwork as Cowper checkerwork, two types of Siemens checkerwork, Lichte checkerwork and combined checkerwork have already been sufficiently researched, successfully applied and widely used for glass furnaces of various designs. All of them are made of standard refractory bricks. Basket checkerwork and cruciform checkerwork that are made of fused-cast molded refractory materials have been widely used recently as well.

Further improvement of regenerative heat exchangers thermal efficiency only by replacing the checkerwork does not seem possible unless their size being increased. But this enlarging is not always realizable during the modernization of existing furnaces.

From this point of view heat storage elements with a phase transition, where metal salts and their mixtures are used as a fusible agent look promising for glass furnaces.

These elements can accumulate additional amount of heat due to phase transition, which allows to increase significantly heat exchanger thermal rating without its size and operating conditions changing.

However, it is necessary to carry out additional studies of this type of checkerwork dealing with analysis of complex unsteady heat exchange processes in regenerators and selection of appropriate materials that satisfy the operating conditions of regenerative heat exchangers so that the checkerwork can be widely used for glass furnaces.

Keywords: glass furnace, utilization of flue gas heat, regenerative heat exchangers, regenerator packing, efficiency.