

*О.В. КОШЕЛЬНИК*, канд. техн. наук, ІПМаш НАН України

## **ВИБІР ЕФЕКТИВНИХ ВОГНЕТРИВКИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕГЕНЕРАТОРІВ ПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ**

Наведено основні характеристики вогнетривких матеріалів та рекомендації по їх використанню в насадках регенераторів з урахуванням умов експлуатації ванних плавильних печей скляного виробництва. Представлено результати дослідження роботи теплоакumuлюючої насадки регенераторів плавильної печі при використанні сучасних вогнетривких матеріалів.

The basic characteristics of refractory materials and recommendations on their use in regenerators checkerworks taking into account glass-melting furnaces operation conditions in are given. The results of research of regenerators heat accumulating checkerwork of the melting furnace using modern refractory materials are presented.

**Постановка проблеми.** Регенеративні теплообмінники (РТ) з нерухомою вогнетривкою насадкою широко застосовуються у теплотехнологічних схемах промислових підприємств коксохімічного виробництва, в металургійній та скляній промисловості. Вони є складовою частиною плавильних та нагрівальних печей і використовуються для підігріву повітря горіння шляхом утилізації теплоти димових газів, що відходять з робочої зони технологічних агрегатів [1].

Відзначимо, що РТ мають ряд істотних конструктивних особливостей, які обумовлені призначенням і характеристикою основних технологічних агрегатів. Так, регенератори доменних печей мають великі габаритні розміри, систему автономного опалення [2]. РТ ванних плавильних печей, які використовуються для виробництва скла, сталі, флюсів та нагрівальних печей мають відносно невеликі габаритні розміри насадочної камери і використовують в якості гарячого теплоносія димові гази, що відходять з робочого простору печей з температурою 1000 – 1350 °С [1, 3, 4].

Вогнетривкі теплоакumuлюючі елементи РТ в процесі експлуатації працюють у складних умовах, які пов'язані з циклічною зміною та значним перепадом температур при переключенні регенератора з нагрівання на режим охолодження, наявності в потоці димових газів пилу шихтових матеріалів та інших агресивних газоподібних продуктів [3, 4].

**Виділення невирішеної частини загальної проблеми.** Характерним для всіх регенераторів є використання різних типів теплоакumuлюючих елементів насадок, великого асортименту вогнетривких матеріалів, які мають різні теплофізичні властивості. В силу ряду причин раніше умовам роботи регенераторів плавильних печей приділялось недостатньо уваги. Для їхнього розрахунку використовувалися наближені методики, які зводилися до визначення загального обсягу насадки й розмірів насадочної камери. Вони не враховували реальні умови роботи технологічних агрегатів і регенераторів [4]. В останній час нами створено уточнені методики розрахунку регенераторів плавильних і нагрівальних печей [5, 6].

В умовах різкого зростання світових цін на природний газ та вогнетривкі матеріали актуальною проблемою є підвищення ефективності роботи плавильних агрегатів шляхом удосконалення конструктивних і режимних параметрів регенераторів з метою підвищення температури нагрівання повітря горіння. Більшість регенеративних плавильних печей обладнані однокамерними регенераторами, але в останній час почали використовуватися регенератори з багатокамерною компановкою. При цьому використовуються також різні типи насадки і різні вогнетривкі матеріали, властивості яких суттєво впливають на тривалість і ефективність роботи РТ.

Обґрунтований вибір вогнетривких матеріалів для теплоакumuлюючих елементів регенераторів скловарних печей дає можливість значно поліпшити теплотехнічні показники агрегатів, продовжити термін їх експлуатації, поліпшити економічні показники технологічних процесів.

**Мета дослідження** полягає в дослідженні теплової роботи регенераторів плавильних печей склоробного виробництва при умові обґрунтованого використання сучасних вогнетривких матеріалів для теплоакumuлюючих елементів різних зон насадки.

**Основний матеріал дослідження.** З використанням системного підходу було розроблено загальну методику дослідження РТ різного призначення, включаючи регенератори скловарних печей. Визначення теплотехнічних показників роботи регенераторів здійснювали за допомогою створених нами удосконалених математичних моделей регенераторів плавильних і нагрівальних печей, які створено з урахуванням особливостей їх компановки, конструкції і умов експлуатації насадки [3, 5]. Для регенераторів основною моделлю є математична модель складного нестационарного теплообміну в каналах теплоакumuлюючої насадки в циклічних процесах її нагрівання та охолодження.

ня. Відзначимо, що запропонований обчислювальний комплекс є достатньо універсальним і дає можливість розраховувати різні типи теплообмінників, включаючи одно-, дво- та трьохкамерну компоновку регенераторів [6].

Як відомо, при виборі вогнетривких матеріалів насадки необхідно враховувати ряд факторів для забезпечення тривалої роботи РТ (рис. 1).

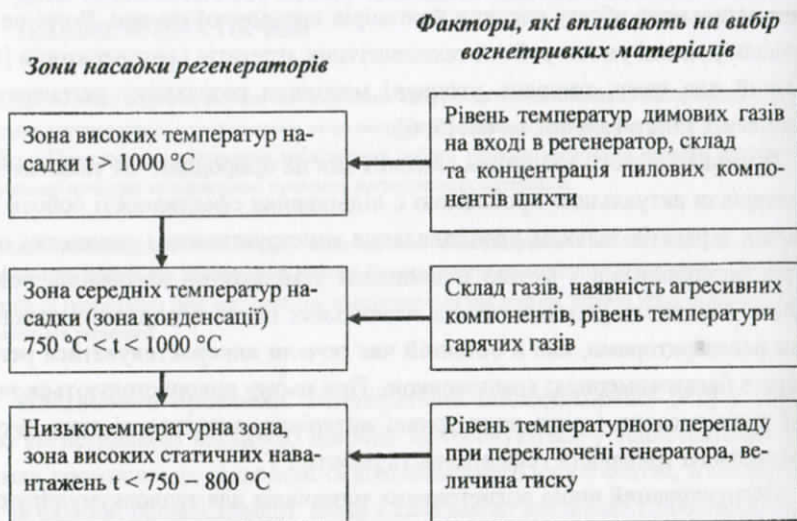


Рис. 1. Основні фактори, які впливають на вибір вогнетривких матеріалів для насадок регенераторів скловарних печей

Як відомо з досвіду експлуатації печей високотемпературна (перша) зона насадки (до 30 % усієї висоти насадки) піддана впливу пиловидних компонентів шихти, а також сполук ванадію й нікелю, що містяться в продуктах згоряння палива. Вогнетривкі матеріали цієї зони працюють при температурах 1100 – 1350 °С. Руйнування вогнетривів відбувається при фізико-хімічній взаємодії розплавлених часток агресивних речовин з поверхнею вогнетривів елементів насадки РТ. У другій зоні рівень температур становить близько 800 – 1100 °С, відбувається конденсація сульфатів лужних і лужноземельних металів, що також може привести до руйнування верхнього шару вогнетривких матеріалів. Нижня частина насадки характеризується найбільшим перепадом температур теплоносіїв при перемиканні режимів роботи теплообмінника. Різниця температур теплоносіїв  $\Delta t = t'_{\Gamma} - t''_{\Pi}$  може становити величину 600 – 650 °С.

У теперішній час для кладки насадки регенераторів сучасних скловарних печей використовують вогнетривкі матеріали двох груп – плавленолиті формові та обпалені. Вітчизняні вогнетривкі матеріали мають обмежений термін експлуатації, їх стійкість є недостатньою для умов роботи скловарних печей. Тому нами розглянуто основні види вогнетривких матеріалів, що випускаються провідними європейськими фірмами, які використовують для теплоакуюлюючих елементів насадки регенераторів скловарних печей, що є доступними на ринку України (табл. 1, 2). До цих матеріалів відносять вогнетриви, що випускаються фірмами SEPR, VRD, VGG, Motim. Деякі їх властивості наведені нижче по даним фірм-виробників.

Таблиця 1

Хімічний склад плавленолитих вогнетривких матеріалів

Вогнетривкий матеріал	Хімічний склад				
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O та домішки	MgO
ER1621RX	55,8	15,0	23,5	5,7	–
ER1682RX	50,6	32,5	15,6	1,3	–
ER5312RX	87,5	–	0,5	1,3	7,5
ZIRKOSIT-S	51,5	33,8	13,3	1,4	–
Monofrax CS-3	49,0	34,0	15,0	2,0	–

Таблиця 2

Хімічний склад обпалених вогнетривких матеріалів

Вогнетривкий матеріал	Хімічний склад				
	MgO	ZrO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Anker DG1	97,0	–	0,6	0,1	0,1
Anker DG2	97,0	–	0,5	0,1	0,1
Anker DG3	95,0	–	3,0	0,1	0,5
Rubinal VZ	78,0	12,5	8,0	0,3	0,4
Rubinal EZ	75,0	12,5	10,0	0,2	0,4

Для продовження терміну експлуатації регенераторів доцільно використовувати багатоярусні насадки с різними вогнетривкими матеріалами. Вибір матеріалів для кожної зони необхідно проводити у відповідності з рівнем температур, з урахуванням теплофізичних, хімічних та механічних властивостей вогнетривів. Рекомендації по використанню вогнетривів для регенераторів для специфічних умов їх експлуатації представлені на рис. 2. При їх виборі враховано стійкість відповідних вогнетривів до руйнування під впливом

агресивних елементів пилогазового потоку, різких змін температури теплоносіїв після перемикання регенераторів, статичних навантажень, тощо.

		Камера 1	Камера 2
<i>1-зона</i>	ER5312RX	<i>1-зона</i>	<i>1-зона</i>
	Rubinal VS, VZ		
	<i>2-зона</i>	ER1682RX	<i>2-зона</i>
ZIRKOZIT-S	ER1682RX		
Monofrax CS-3	ZIRKOZIT-S		
Anker DG1	Monofrax CS-3		
Anker DG2	Anker DG1		
Rubinal EN, EZ, EFZ	Anker DG2		
<i>3-зона</i>	Rubinal EN, EZ, EFZ		
ER1621RX			
Anker DG3			
Шамот			
<i>a</i>		<i>б</i>	

Рис. 2. Рекомендації щодо розподілу вогнетривких матеріалів по зонам насадки для регенераторів скловарних печей:

*a* – однокамерні; *б* – двокамерні регенератори

Слід зазначити, що практично всі вогнетриви мають щільність від 2960 кг/м<sup>3</sup> (Anker DG3) до 3300 кг/м<sup>3</sup> (ER1682RX). Міцність при стиску становить від 60 МПа (Anker DG3, ER5312RX) до 210 МПа (ER1682RX). Відзначимо, що вогнетриви відрізняються своїми теплофізичними властивостями, зокрема коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  може сягати понад 3,3 – 6 Вт/(м К). Так, для плавнелитих вогнетривких матеріалів, окрім Monofrax, коефіцієнт  $\lambda$  збільшуються з ростом температури, а для обпалених вогнетривких матеріалів коефіцієнт  $\lambda$  зменшується при підвищенні температури. Ці особливості необхідно враховувати при теплотехнічних розрахунках регенераторів. Температура деформації під навантаженням, для більшості вогнетривких матеріалів складає близько 1670 – 1700 °С, окрім Rubinal EZ, для якого вона рівняється 1570 °С.

Для секційних регенераторів з поперечним напрямком полум'я доцільно використовувати такий розподіл вогнетривів: для максимальної зони температур – Rubinal VZ, VS, ER5312 RX, ZIRKOSIT-S, Monofrax CS-3; для регенераторів зони освітлення – ER1621RX, Anker DG3.

Використання запропонованих сполучень вогнетривких матеріалів для насадки регенеративних теплообмінників забезпечить їхню тривалу експлуатацію без гарячих ремонтів протягом всієї кампанії печі. Вимоги до вогнетривких матеріалів включають також необхідність забезпечення високої теплової ефективності роботи теплоакумуючих елементів.

Для порівняння теплової ефективності різних типів вогнетривких матеріалів виконано моделювання теплової роботи однокамерного РТ скловарної печі зі сталим обсягом насадочної камери  $78,3 \text{ м}^3$  і висотою насадки  $4,95 \text{ м}$ . Деякі результати розрахунків регенераторів дано у табл. 3.

Таблиця 3

Теплотехнічні характеристики роботи регенераторів при використанні теплоакумуючих насадок з різних вогнетривких матеріалів

№№ варіантів	Температура газів, °С		Температура повітря, °С		Теплова потужність, $Q_p$ , МДж
	$\bar{t}_r''$	$t_r''$	$\bar{t}_n''$	$t_n''$	
1	653	687	1092	1069	5878,7
2	657	686	1090	1070	5871,9
3	656	685	1092	1072	5882,3
4	648	675	1083	1046	5825,2
5	675	678	1081	1048	5813,7
6	652	680	1077	1039	5785,7

Температура газів на вході в насадку регенератора  $t_r' = 1300 \text{ °С}$ , повітря –  $t_n' = 80 \text{ °С}$ . Розрахунки використано для сучасної насадки типу Topfstein з каналом  $140 \times 140 \text{ мм}$  із вогнетривів – ER1621RX, Monofrax CS-3, ER5312RX (табл. 3, вар. 1 – 3). Також розраховувалась насадка Ліхте з каналом  $145 \times 145 \text{ мм}$  із матеріалів – Anker DG1, Anker DG3, Rubinal VZ (табл. 3, вар. 4 – 6).

Із наведених у табл. 3 даних видно, що при використанні різних видів вогнетривких матеріалів для розглянутих типів насадок середня температура нагрівання повітря  $\bar{t}_n''$  змінюється у діапазоні  $1077 - 1092 \text{ °С}$ , тоді як середня температура димових газів, що відходять з регенератора  $\bar{t}_r''$ , змінюється від  $652$  до  $675 \text{ °С}$ . Максимальна температура газів у кінці періоду нагрівання  $t_r''$  змінюється усього на  $11 \text{ °С}$ , а температура повітря у кінці періоду нагрівання  $t_n''$  змінюється з  $1039$  до  $1072 \text{ °С}$ , що складає  $3,08 \%$ . Це свідчить про те, що теплофізичні властивості розглянутих вогнетривких матеріалів істотно не відрізняються, що обумовило сталі показники роботи регенератора по тепло-

вій потужності. Так, при використанні обпалених вогнетривких матеріалів зміна теплової потужності  $Q_{II}$  становить від 5785,7 МДж до 5825,2 МДж, а для плавленолитих вогнетривів – від 5871,7 до 5882,3 МДж, що складає усього 0,68 % та 0,18 % відповідно.

**Висновки.** Вибір вогнетривких матеріалів для кожної зони насадки регенераторів скловарних печей необхідно здійснювати з урахуванням експлуатаційної стійкості матеріалів і можливості тривалої їх роботи в плавильних агрегатах з відповідними теплотехнічними параметрами.

Теплофізичні властивості розглянутих вогнетривких матеріалів майже однакові, тому їх заміна несуттєво впливає на теплотехнічні показники роботи регенераторів плавильних печей при однакових режимних параметрах і температурному діапазоні. Результати досліджень є основою для діагностики і оптимізаційних розрахунків параметрів вогнетривкої насадки і теплових режимів регенераторів ванних печей склоробного виробництва.

**Список літератури:** 1. *Перелетов И.И., Бровкин Л.А., Розенгарт Ю.И. и др.* Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с. 2. *Гресс Л.П.* Энергосбережение при нагреве доменного дутья. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 209 с. 3. *Гоцман В.Ю., Руслов В.Н., Костыря В.А.* Печная теплотехника в производстве стекла. – Харьков: Факт, 1997. – 288 с. 4. *Козлов А.С.* Теплотехника регенеративных стекловаренных печей. – М.: Легпромбытиздат, 1990. – 143 с. 5. *Кошельник В. М., Кошельник А.В., Долженко Е.Ю.* Применение математических моделей для диагностики технико-экономических параметров системы регенерации тепла высокотемпературных теплотехнологических установок // Интегровані технології та енергозбереження. – 2004. – № 1. – С. 40 – 44. 6. *Кошельник О. В.* Методика створення універсального обчислювального комплексу для моделювання регенеративних теплообмінників високотемпературних плавильних агрегатів // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 2/3 (26). – С. 47 – 50.

*Надійшла до редколегії 21.05.08.*