

Олабін В.М., канд. техн. наук, **Максимук О.Б.,** канд. техн. наук,
Трухан С.П., Нікітіна І.В.

Інститут газу НАН України, Київ

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: olabin@ukr.net

Рекуператори плавильних барботажних печей

Представлено інформацію про використання трубчастих радіаційних рекуператорів на плавильних барботажних печах. Проаналізовано чинники, які впливають на погіршення з часом експлуатаційних показників рекуператорів. За результатами аналізу роботи рекуператорів плавильних барботажних печей розроблено нові конструкції рекуператорів, в яких для запобігання неконтрольованої деформації теплосприймаючих труб використано підвісний верхній колектор з противагами та петлеподібні компенсатори відповідної конструкції. Нова конструкція дозволяє підвищити ефективність використання рекуператора, можливе очищення та ремонт труб без демонтажу кладки шахти. *Бібл. 6, рис. 5, табл. 2.*

Ключові слова: трубчастий радіаційний рекуператор, ступінь теплосприйняття, покриття труб дрібнодисперсним шаром часток шихти, температурне розширення, компенсація розширення.

Повернення частини тепла відхідних газів у робочу камеру печі є одним з найбільш ефективних способів підвищення теплового ККД високотемпературних печей, зокрема плавильних барботажних печей із зануреним спалюванням газу. Найбільш успішно це реалізується підігрівом повітря, яке використовується для спалювання палива, та підігрівом шихти перед подачею її в зону плавлення.

Підігрів повітря забезпечує економію палива не лише за рахунок внесення до робочої камери фізичного тепла, але й за рахунок підвищення температури горіння палива, що сприяє прискоренню процесів плавлення. Для підігріву повітря існують різні типи рекуператорів [1, 2]. Вони відрізняються за конструкцією, матеріалом, загальною поверхнею теплообміну, технічними характеристиками, способом інтенсифікації теплообміну тощо. З цього переліку для обладнання плавильних барботажних печей, розроблених в Інституті газу НАН України, найбільш придатні трубчасті радіаційні рекуператори [3].

Рекуператор розміщується над водоохолоджуваною сепараційною ділянкою плавильної ванни печі. Враховуючи високу температуру (1100–1400 °С) димових газів на вході, рекуператори працюють в прямотоковому режимі. Саме такими рекуператорами були обладнані промислові плавильні барботажні печі на ВАТ «Комбінат будіндустрії» (Київ) та ОАО «Береабудматеріали» (м. Береза, Білорусь).

Схема печі, обладнаної трубчастим радіаційним рекуператором, показана на рис.1. У цих печах з шлакобазальтової або базальтодо-

ломітової шихти отримують до 3 т/год розплаву, з якого методом центрифугування виготовляється мінеральне волокно для теплоізоляції.

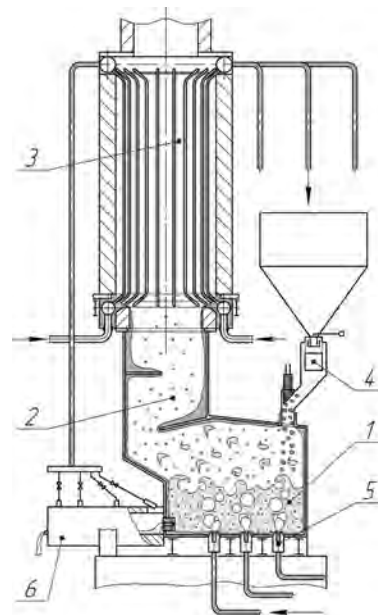


Рис.1. Схема плавильної барботажної печі з трубчастим радіаційним рекуператором: 1 – ванна плавильна; 2 – сепараційна ділянка; 3 – рекуператор; 4 – завантажувальний пристрій; 5 – донні пальники зануреного спалювання газу; 6 – канал подачі розплаву на центрифугу, що обігрівается.

Теплосприймаюча поверхня трубчастих радіаційних рекуператорів складається з ряду труб малого діаметра, які розміщені по колу близько до стінок шахти рекуператора, тобто

мають вигляд циліндричного «кошика». Кінці труб приварені до кільцевих розподільчих колекторів, які використовуються для підведення та відведення повітря. Колектори розділені на секції відповідно до кількості пальників, за допомогою яких здійснюється занурене спалювання газу в плавильній ванні печі. Труби отримують тепло прямим випромінюванням від димових газів, які проходять через шахту рекуператора, або опосередковано завдяки випромінюванню від розігрітих стінок шахти, виконаної з вогнетриву.

Для аналізу особливостей роботи трубчастих радіаційних рекуператорів, встановлених на плавильних барботажних печах, використані експлуатаційні показники двох рекуператорів,

Таблиця 1. Геометричні параметри рекуператорів

Параметр	ВАТ «Комбінат будіндустрії» (піч № 1)	ДПП «Береабудматеріали» (піч № 3)
Діаметр рекуператора, мм	1300	1500
Вага металоконструкції, кг	1840	2030
Діаметр шахти, мм	1600	1750
Діаметр труб ($d_3/d_{вн}$), мм	50/42	57/50
Висота, м	5	5
Кількість труб, мм	40	42
Кількість секцій	4	4
Поверхня нагріву, м ²	32	38
Матеріал труб	12X18Н9Т	12X18Н9Т



Рис.2. Динаміка зменшення ступеня утилізації тепла димових газів у залежності від терміну експлуатації рекуператора: 1 – піч № 1 ВАТ «Комбінат будіндустрії»; 2 – піч № 3 ДПП «Береабудматеріали».

встановлених один на плавильній печі № 1 ВАТ «Комбінат будіндустрії», а другий на плавильній печі № 3 комбінату «Береабудматеріали». Геометричні параметри рекуператорів наведені в табл.1, експлуатаційні показники їхньої роботи – у табл.2.

Як видно з табл.2, в обох рекуператорах з часом спостерігається зниження ступеня засвоєння тепла димових газів. На рис.2 графічно зображено, як знижується ступінь засвоєння тепла в рекуператорі. За перші півроку експлуатації рекуператора печі № 1 підігрів повітря зменшився на 30 % порівняно з розрахунком, а за наступні 19 міс – ще на 28,6 % (крива 1). Це обумовлено в основному тим, що

Таблиця 2. Характеристики рекуператорів у залежності від терміну експлуатації

Показник	Рекуператор плавильної печі № 1								Рекуператор плавильної печі № 3				
	розрахунок	5 міс	9 міс	14 міс	22 міс	23 міс	25 міс	30 міс	розрахунок	3 міс	9 міс	24 міс	34 міс
Витрати повітря, м ³ /год:	8000	8360	8670	8650	8600	8820	8610	8540	8700	8500	8700	9100	8950
секція 1	1400	1360	1320	1250	1300	1500	1350	1300	2500	2400	2400	2800	2800
секція 2	2200	2300	2400	2400	2400	2230	2340	2400	2500	2400	2500	2700	2600
секція 3	2200	2500	2500	2500	2500	2560	2460	2440	2500	2400	2550	2800	2730
секція 4	2200	2260	2450	2500	2400	2530	2460	2400	1200	1300	1250	800	820
Витрати продуктів горіння, м ³ /год	7360	7800	8185	9560	8130	8150	8186	8164	8350	8020	8295	9220	9045
Температура продуктів горіння, °С:													
вхід	1200	1150	1180	1140	1150	1170	1210	1220	1250	1200	1240	1210	1230
вихід	830	876	952	939	964	988	992	1114	820	777	811	849	894
Температура повітря, °С:													
вхід	20	25	21	27	35	30	26	30	50	43	38	32	34
вихід:													
секція 1	400	376	324	278	280	268	322	270	500	440	486	400	378
секція 2	400	300	293	266	240	230	278	245	500	450	456	424	388
секція 3	400	275	263	237	230	207	270	242	500	460	450	390	374
секція 4	400	290	253	237	236	210	272	248	500	520	550	490	470
Прихід тепла, Гкал/год	3,3	3,35	3,61	4,035	3,49	3,57	3,7	3,72	3,39	3,58	3,86	4,17	4,16
Засвоєне тепло, Гкал/год	0,967	0,728	0,689	0,608	0,558	0,536	0,691	0,591	1,396	1,136	1,22	1,127	1,034
Ступінь утилізації, %	29,3	21,7	19,1	17,4	16	15	18,6	15,9	35	31,7	31,57	27	24,8

на поверхні труб поступово осідають частинки шихти, які виносяться з ванни та утворюють багастний ізоляційний шар. Піч № 1 була першою промисловою плавильною барботажною піччю з зануреним спалюванням газу. В процесі освоєння печі було багато зупинок, перші плавки були короткими. Гранулометричний склад шихти містив до 10 % дрібної фракції (0–2 мм). Після освоєння піч працювала в тижневому режимі із зупинками лише на вихідні, і це позначилося на експлуатаційних показниках рекуператора. Очевидно, найбільш інтенсивне заростання труб відбувається при запусках печі, коли в ванні ще недостатньо розплаву і шихта завантажується безпосередньо на пальники, які розміщені в днищі плавильної ванни.

Експлуатаційні показники рекуператора, встановленого на печі № 3 (крива 2), суттєво відрізняються від показників рекуператора печі № 1. Темп зниження ступеня засвоєння тепла димових газів у рекуператорі печі № 1 складав 0,34 % в місяць на протязі 20 міс після освоєння, а в рекуператорі печі № 3 лише 0,22 % в місяць на протязі 30 міс після освоєння. Це можна пояснити тим, що в шихті, яка завантажувалася в піч № 3, була майже відсутня дрібна фракція, та зупиняли піч приблизно один раз на місяць для поточного ремонту технологічного обладнання.

Після 25 міс експлуатації рекуператора печі № 1 було проведено експеримент з очищення теплосприймаючих труб від шару налиплих дрібнодисперсних часток шихти. У конструкції рекуператора не передбачено виконання таких операцій, тому було складно проводити очистку. Шар налиплих часток шихти був у вигляді крихкої спеченої маси. В результаті очистки вдалося в значній мірі відновити ступінь засвоєння тепла димових газів (крива 1).

Додатковим чинником зменшення ступеня теплосприйняття в рекуператорі є неконтрольована деформація труб.

У робочому режимі труби можуть мати температуру до 850 °С (максимальна температура тривалої експлуатації для сталі Х18Н10Т). При таких високих температурах металеві труби зазнають значного теплового розширення (видовження). Видовження труб рекуператорів висотою 5 м може досягати 80 мм, враховуючи, що лінійний коефіцієнт теплового розширення сталі, що використовувалася, $\beta = 19,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ [4].

У даному випадку рекуператори були розміщені вертикально у висячому стані, верхній колектор був закріплений нерухомо, а нижній міг вільно опускатися при нагріванні труб або підніматися при охолодженні. На протязі певного періоду при освоєнні плавильної барбо-



Рис.3. Вигляд теплосприймаючих труб рекуператора печі № 1 ВАТ «Комбінат будіндустрії».

тажною печі видовження труб фіксувалося на рівні 60–74 мм, що відповідає середній температурі стінок 600–780 °С. З часом величина переміщення нижнього колектора значно скоротилася.

Виявилось, що частина дрібнодисперсної фракції шихти та краплі розплаву, які виносяться при інтенсивному барботажі в сепаративну зону, поступово заповнили вільний простір навколо нижнього колектора. Виникла ситуація, коли обидва колектори стали нерухомими. У цьому випадку компенсація термічного розширення відбувалася за рахунок неконтрольованої деформації труб.

На рис.3 зафіксовано вигляд труб, який вони мали в охолодженому стані після року експлуатації. У робочому (розігрітому) стані деформація труб була значно більшою. Розрахунок показує, що максимальне відхилення труб від початкової вертикалі могло складати більше 350 мм. При цьому в найвужчому місці діаметр рекуператора зменшується більш ніж вдвічі, труби притискаються одна до одної.

Таким чином, при вибраній схемі розміщення рекуператора на плавильній барботажній печі в процесі експлуатації відбуваються суттєві зміни геометрії рекуператора. Ці зміни також впливають на погіршення експлуатаційних показників рекуператора порівняно з проектними.

Для запобігання неконтрольованій деформації теплосприймаючих труб рекуператора при їхньому температурному розширенні розроблено вдосконалену конструкцію рекуператора (рис.4).

По-перше, при встановленні на каркасі печі такої металоконструкції рекуператора нерухомо закріплюються секції нижнього колектора, а верхній колектор має можливість вільно пе-

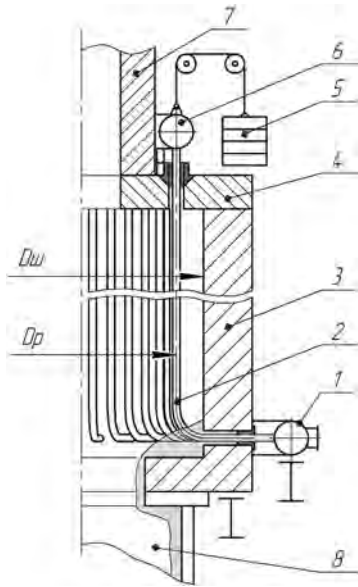


Рис.4. Схема рекуператора з верхнім підвісним колектором: 1 – колектор вхідний; 2 – теплосприймаючі труби; 3 – кладка шахти; 4 – кришка; 5 – противаги; 6 – колектор вихідний підвісний; 7 – димохід; 8 – сепараційна ділянка барботажної печі.

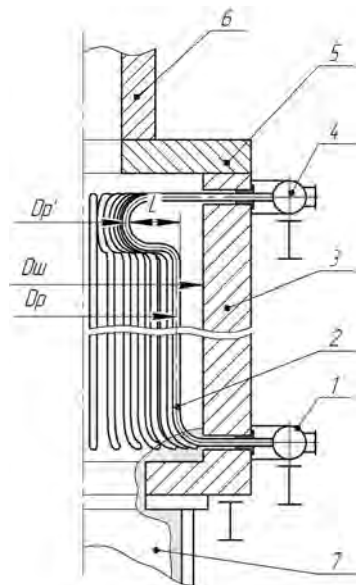


Рис.5. Схема рекуператора з петлеподібними компенсаторами термічного видовження труб: 1 – колектор вхідний; 2 – теплосприймаючі труби; 3 – кладка шахти; 4 – колектор вихідний; 5 – кришка; 6 – димохід; 7 – сепараційна ділянка барботажної печі.

реміщуватися по вертикалі. Верхні кінці труб вертикально проходять через отвори в кришці шахти рекуператора та знизу приварюються до колектора. Така конструкція забезпечує вільне лінійне розширення труб та значно полегшує вирішення завдання стосовно ущільнення рекуператора. По-друге, для зменшення навантажен-

ня на труби, на які тисне власна вага та вага колектора, передбачено використання противаг.

На рис.5 представлено альтернативний варіант конструкції рекуператора, де для компенсації температурних розширень використовуються теплосприймаючі труби з компенсаторами у вигляді петлі в радіальній площині, спрямованій всередину газоходу.

Ця конструкція є вдосконаленням раніше запатентованого рекуператора [5]. Запропонована конфігурація теплообмінних труб забезпечує контрольовану деформацію, тобто дозволяє уникнути притискання труби до труби або до стінок газоходу. Використання петлеподібних компенсаторів дасть змогу забезпечити стабільність технічних показників рекуператора та збільшити термін його експлуатації.

При виготовленні теплосприймаючих труб з компенсаторами мінімальний радіус згинання дорівнює $3,5 d_{тр}$ [6], відповідно петля має величину вигину $L \geq 7d_{тр}$. У найвужчому місці на рівні компенсаційних петель діаметр рекуператора зменшується до величини $D'_p = D_p - 2L$. Ця обставина обмежує використання такої конструкції, бо вона прийнятна для рекуператорів великого діаметра.

Важливою позитивною відмінністю такої конструкції є простота та доступність при виконанні ремонтних робіт по заміні окремих теплосприймаючих труб, що вийшли з ладу, або при періодичному очищенні труб від налипання. Головне, що заміна або очищення труб може проводитися без розбирання кладки шахти рекуператора. Послідовність операцій при заміні труб: кінці труби від'єднуються від колекторів, труба виштовхується в шахту та через ремонтний лаз плавильної ванни видаляється з печі. Виконуючи операції у зворотному порядку, встановлюють очищену або нову трубу. Таким досить простим способом можна замінювати всі труби. Ремонт виконується швидко та без значних працевитрат.

Для протидії інтенсивному заростанню теплосприймаючих труб рекуператора при запуску плавильної печі доцільно використовувати крупнокускову шихту без дрібної фракції. Пріоритетним є безперервний режим роботи плавильної печі з мінімальною кількістю зупинок. Періодичне очищення теплосприймаючих труб дозволяє відновлювати ефективність роботи рекуператора.

Висновки

За результатами аналізу роботи рекуператорів плавильних барботажних печей розроблено нові конструкції рекуператорів, у яких для

запобігання неконтрольованій деформації теплосприймаючих труб використано підвісний верхній колектор з противагами та петлеподібні компенсатори відповідної конструкції.

Список літератури

1. Тебеньков Б.П. Рекуператоры для промышленных печей. — М. : Металлургия, 1975. — 296 с.
2. Лашенков Ю.В., Волков В.А., Тюрин А.И. Опыт проектирования и эксплуатации трубчатых радиационных рекуператоров // Стекло и керамика. — 1984. — № 4. — С. 18–20.
3. Олабин В.М., Гоберис С.Ю., Маразас В.М. и др. Опытный газовый плавильный агрегат для мине-

- рловатного производства // Строительные материалы. — 1976. — № 11. — С. 11–12.
4. Лариков Л.Н., Юрченко Ю.Ф. Структура и свойства металлов и сплавов : Справ. — Київ : Наук. думка, 1985. — 438 с.
 5. Пат. на корис. модель 61863 Укр., МПК F 23 D 14/12 (2006.01). Трубчастий радіаційний рекуператор / В.М.Олабін, О.Б.Максимук, С.П.Трухан, І.В.Нікітіна. — Опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14.
 6. Севастьянов М.И. Технологические трубопроводы нефтедобывающих и нефтехимических заводов : Справ. пособие. — М. : Химия, 1972. — 312 с.

Надійшла до редакції 16.05.17

**Олабин В.М., канд. техн. наук, Максимук А.Б., канд. техн. наук,
Трухан С.П., Никитина И.В.**

Институт газа НАН Украины, Киев

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина. e-mail: olabin@ukr.net

Рекуператоры плавильных барботажных печей

Представлена информация об использовании трубчатых радиационных рекуператоров на плавильных барботажных печах. Проанализированы причины, влияющие на ухудшение со временем эксплуатационных показателей рекуператоров. По результатам анализа работы рекуператоров плавильных барботажных печей разработаны новые конструкции рекуператоров, в которых для предотвращения неконтролируемой деформации теплоприемных труб использованы подвесной верхний коллектор с противовесом и петлеобразные компенсаторы соответствующей конструкции. Новая конструкция позволяет повысить эффективность использования рекуператора, возможны очистка труб и ремонт без демонтажа кладки шахты. *Библ. 6, рис. 5, табл. 2.*

Ключевые слова: трубчатый радиационный рекуператор, степень тепловосприятости, покрытие труб мелкодисперсным слоем частиц шихты, температурное расширение, компенсация расширения.

**Olabin V.M., Candidate of Technical Sciences, Maksymuk O.B.,
Candidate of Technical Sciences, Trukhan S.P., Nikitina I.V.**

The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev

39, Degtyarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: olabin@ukr.net

Recuperators of Melting Bubbling Furnaces

Information on the use of tubular radiation recuperators on melting bubble furnaces is presented. The reasons that subsequently affect deterioration of the recuperators performance have been analyzed. New structure of the recuperators, in which a hanging top collector with a counterweight and appropriate loop-type expansion joints are applied to prevent uncontrolled deformation of heat-receiving pipes, have been designed based on the analysis of the operation of recuperators of melting bubbling furnaces. New design allows to increase efficiency of the recuperator application, cleaning and repair of the pipes are possible without dismantling of the stack brick work. *Bibl. 6, Fig. 5, Tab. 2.*

Key words: tubular radiation recuperator, bubbling furnace, degree of heat perception, adherence to pipes, fine layer of batch particles, thermal expansion, compensation of expansion.

References

1. Teben'kov B.P. Rekuperatory dlja promyshlennyh pechej [Recuperators for industrial furnaces], Moscow : Metallurgija, 1975, 296 p. (Rus.)
2. Lashenkov Yu.V., Volkov V.A., Tyurin A.I. Opyt proektirovaniya i jekspluatacii trubchatyh radiacionnyh rekuperatorov [Experience of Design and Operation of Tubular Radiation Recuperators], *Steklo i keramika [Glass and Ceramics]*, 1984, (4), pp. 18–20. (Rus.)
3. Olabin V.M., Goberis S.Yu., Marazas V.M. Opytnyj gazovyj plavil'nyj agregat dlja mineralovatnogo proizvodstva [Experimental gas melting whit for mineral wool production], *Stroitel'nye materialy*, 1976, (11), pp. 11–12. (Rus.)
4. Larikov L.N., Yurchenko Yu.F. Struktura i svoistva metallov i splavov [Structure and properties of metals and alloys directory], Kiev : Naukova Dumka, 1985, 438 p. (Rus.)
5. Pat. 61863 Ukr., MPK F 23 D 14/12 (2006.01) [Tubular radiation recuperator], V.M.Olabin, O.B.Maksymuk, S.P.Trukhan, I.V.Nikitina, Publ. 25.07.2011, Bull. 14. (Ukr.)
6. Sevastianov M.I. [Technological pipelines of oil refinery and petrochemical plants], Moscow : Himija, 1972, 312 p. (Rus.)

Received May 16, 2017

Подписывайтесь на журнал
«Энерготехнологии и ресурсосбережение» (индекс 74546)
на 2018 г. по Сводному Каталогу агентства
«УКРИНФОРМНАУКА»

По вопросам организации подписки обращайтесь по адресам:

в Украине**ООО «Укринформнаука»**

Директор «Укринформнаука»
Яцкив Татьяна Михайловна
Тел.: +38 (044) 288-03-46
e-mail: innovation@nas.gov.ua
<http://u-i-n.com.ua>

в России**ООО «Информнаука»**

Начальник отдела по работе с издателями
Богачева Екатерина Сергеевна
Тел.: +7 (495) 787-38-73
Моб.: +7 (916) 668-26-07
ICQ: 643180321
e-mail: e-bogacheva@viniti.ru
<http://www.informnauka.com>