

К. т. н. **В. И. Матюхин** (✉), к. т. н. **А. В. Матюхина**, **Э. Г. Кох**ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет»,
Екатеринбург, Россия

УДК 662.741.323:662.998-494]:621.1.016.4

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ВАННЫХ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО РАСПЛАВА

Наибольшее распространение при производстве волокнистой теплоизоляции с использованием мелкодисперсного сырья (до 10–15 мм) или непрочных легко рассыпающихся горных пород получили ванные печи. Температурное поле жидкой ванны при подковообразном движении газов в рабочем пространстве печи отличается существенной неравномерностью, обусловленной ограниченной дальностью газовых факелов. Сжигание природного газа в рабочем пространстве печи производится с высоким коэффициентом расхода воздуха при полном отсутствии химического недожога. По мере транспортировки дымовых газов от регенератора до трубы количество подсосов возрастает на 44,85 %. Отходящие от регенератора газы характеризуются относительно высокой температурой (570–600 °С) и значительным запасом тепла (до 2022,09 кВт), что требует их дальнейшей утилизации. Тепловой КПД ванной регенеративной печи составляет 39,04 %.

Ключевые слова: ванная регенеративная печь, минеральный расплав, неравномерность температурного поля, тепловой КПД.

Для получения минерального расплава при производстве волокнистой теплоизоляции с использованием мелкодисперсного сырья (до 10–15 мм) или непрочных легко рассыпающихся горных пород наиболее рациональным следует считать применение ваннных печей [1], в которых процесс нагрева и расплавления шихтовых компонентов осуществляется за счет внешнего тепла, поступающего от факела, развивающегося над поверхностью бассейна. Для отопления рекуперативных печей используют жидкое топливо (продукты перегонки нефти, мазут) или газообразное (генераторный, коксовый или природный газ). Такие плавильные агрегаты способны обеспечивать практически любую максимальную производительность (в реальных пределах до 6–8 т/ч). Их принято считать печами-теплообменниками [2], в которых выделение теплоты вне технологической зоны и последующая ее передача нагреваемым материалам осуществляются в результате теплообменных процессов конвекцией или излучением, уровень совершенства которых определяет показатели работы плавильного агрегата. Для

обеспечения камерного режима работы печи, в соответствии с требованиями которого должна обеспечиваться равномерность распределения температуры газовой среды по всему объему рабочего пространства [3], используется рассредоточенный подвод теплоты при организации его факельного сгорания с существенной циркуляцией газов при максимальной степени их черноты. Для этой цели могут применяться все типы ваннных печей: с подковообразным, продольным или поперечным направлением движения пламени [4].

При использовании низкокалорийного топлива необходимая технологическая температура для получения минерального расплава (1500–1550 °С) может быть достигнута с помощью регенеративного или рекуперативного подогрева воздуха до температуры порядка 800–1000 °С отходящими из рабочего пространства газами с температурой выше 1500 °С [5]. Рекуперативный подогрев воздушного дутья используют в основном на малых печах. Его температурный уровень не превышает 700 °С. Этот способ утилизации тепла отходящих газов является менее экономичным, а его использование оправданно только пониженными капитальными и эксплуатационными затратами, а также стабильностью уровня подогрева воздуха и температуры рабочего пространства [6]. В обоих случаях более глубокая утилизация физической теплоты потока дымовых газов может быть организована с использованием котлов-утилизаторов или водяных экономайзеров [7].



В. И. Матюхин
E-mail: matyhin53@mail.ru

Наибольшее распространение в промышленности получили ванны регенеративные печи с площадью зеркала расплава 48 и 62 м² [8]. Основную часть такого агрегата (рис. 1) составляет рабочая камера, которая состоит из бассейна ванной печи 1, перекрытого сверху распорным сводом.

Бассейн ванной печи 1 представляет собой резервуар, наполненный расплавляемыми материалами и жидким расплавом. Его стены и дно изготовлены из огнеупорных материалов, и он располагается, как правило, на отдельном фундаменте с внутренней формой в виде параллелепипеда. Иногда для устранения застойных зон движения расплава он может быть заужен в выработочной части.

В пламенном пространстве печи, ограниченном стенами, сводом 4 и подом 2, в его торцевой части располагаются отверстия, являющиеся влетами горелочных устройств шахтного типа 3. Они обеспечивают подачу топлива 6 и воздуха в рабочее пространство, их перемешивание, устойчивое факельное сжигание, а также организацию движения и удаления технологических газов и продуктов сгорания. В регенеративных ваннах печах для обеспечения равномерности распределения газов по сечению рабочего пространства наиболее часто применяют подковообразное движение газов [9], при котором периодически меняется направление движения факелов.

С боковых сторон рабочего пространства располагаются загрузочные устройства 7 для подачи шихтовых материалов на переплав. Образующийся в результате плавления расплав удаляется из бассейна через специальную футерованную камеру (фидер 8), предназначенную для выравнивания химического состава и температуры жидких продуктов. Для этого в ней

могут использоваться раскаленные газы, поступающие из рабочего пространства, либо образующиеся при сжигании дополнительного топлива в горелочном устройстве 10, расположенном в своде или поперек сечения канала электрическими нагревателями. Выпуск расплава из фидера производится через водоохлаждаемую летку 9, устанавливаемую в его свободном торце. Блок регенераторов 5 или рекуператоров размещается рядом с торцевой стенкой плавильного пространства и соединяется с ним посредством горелочных устройств.

Для осаждения пыли отводимых газов из рабочего пространства между теплоутилизирующими устройствами и плавильной камерой располагаются шлаковики 13, представляющие собой вертикальную огнеупорную камеру с возможностью сбора и удаления пыли из ее нижней части. Через них же осуществляется предварительный нагрев футеровки печи в период выводки.

Изменение направления движения газов в рабочем пространстве осуществляется через установленный промежуток времени при помощи перекидного устройства 12, устанавливаемого сразу после регенератора на газоотводящем канале, идущем к дымовой трубе. В рекуперативных печах, в которых направление движения газов не изменяется, требуемый температурный режим обеспечивается распределенной подачей теплоносителя через несколько горелочных устройств с отводом газообразных продуктов через отдельный газоход.

На одном из минераловатных заводов России используется регенеративная ванная печь с площадью рабочего пространства 62 м². Подача топлива в количестве 625 м³/ч в горелочные устройства производится через две фурмы в двух влетах, установленные с боковой стороны

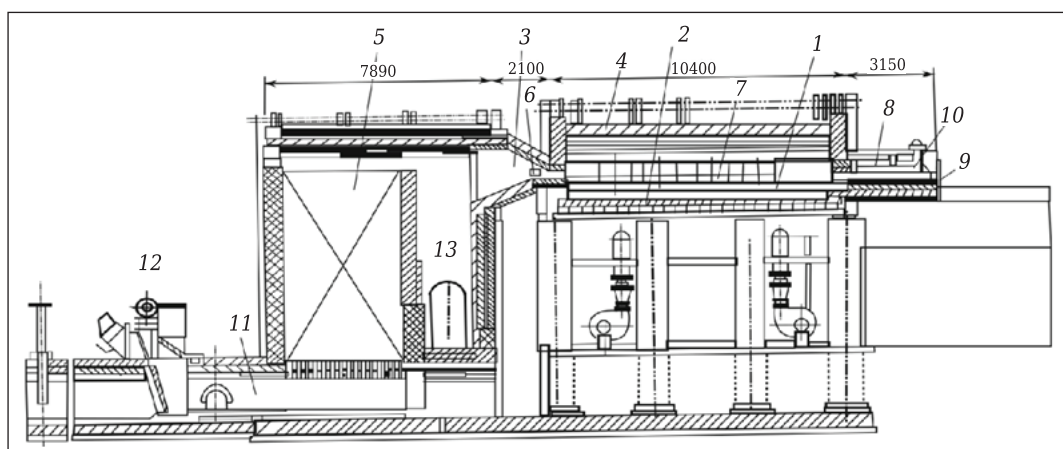


Рис. 1. Регенеративная ванная печь для плавки минерального сырья: 1 — бассейн-ванна; 2 — подина; 3 — влеты горелочных устройств; 4 — свод; 5 — регенератор; 6 — зона подачи газообразного топлива; 7 — загрузочные окна; 8 — фидер; 9 — водоохлаждаемая летка; 10 — горелка отопления фидера; 11 — газоотводящий канал; 12 — перекидное устройство; 13 — шлаковик

под углом 45° к направлению потока горячего воздуха. Образующиеся в результате сжигания топлива газы совершают подковообразное движение в рабочем пространстве, отдавая часть своего тепла расплавленному шлаку, и покидают печь через регенератор, перекидное устройство и отсечной клапан на трубу высотой 60 м. Реверсивное переключение клапанов на печи осуществляют через каждые 30 мин.

Исходные материалы состоят из доменного шлака в смеси с собственными отходами при среднем их количестве 77,62 % и порфирита в количестве 22,38 %. Их химический состав представлен в табл. 1.

Выпуск расплава из печи производят через водоохлаждаемую летку на двухвалковую центрифугу. Химический состав расплавленного продукта зависит от состава исходной шихты и представлен в следующем виде, %: SiO₂ 42,18, Al₂O₃ 13,45, FeO 1,41, TiO₂ 1,74, CaO 25,52, MgO 8,61; модуль кислотности 1,63.

Для изучения реального состояния тепловой работы ванной печи при разработке технических мероприятий по увеличению ее производительности, снижению энергетических затрат и улучшению условий эксплуатации были выполнены ее теплотехнические исследования [10]. Особенности процесса сжигания газообразного топлива в рабочем пространстве ванной печи изучали на основании данных о химическом составе газов, отобранных из рабочего пространства при входе в регенератор, а также по их температуре. Пробы газа отбирали с помощью водоохлаждаемого зонда, устанавливаемого через смотровое окно в торцевой части печи, через равные промежутки времени в течение дымового периода при помощи электрического компрессора. Затем пробы помещали в стеклянные бюретки с последующим анализом на ручном газоанализаторе типа ГХП-3. Результаты замеров и расчетов приведены в табл. 2.

Значения коэффициента расхода воздуха α , доли ед., определяли по формуле [11]

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79 \cdot O_2}{21 \cdot N_2}}$$

где O₂, N₂ — содержание соответствующих компонентов в газе, %.

Анализ полученных данных показал, что сжигание природного газа в ваннах печах производится с высоким коэффициентом расхода воздуха при полном отсутствии химического недожога. Причем, скорее всего, избыток воздуха на горение объясняется неконтролируемым и неуправляемым его подсосом из окружающей среды через отверстия и неплотности в футеровке рабочего пространства при работе печи на естественной тяге трубы.

Температуру газов на входе в печь измеряли с помощью отсасывающей водоохлаждающей термопары с градуировкой ТПП-1. Спай термопары помещали в кварцевый колпачок, который закрепляли внутри кварцевого экрана, свободно вставляемого в водоохлаждаемый корпус. Высокое разрежение, создаваемое компрессором, обеспечивает омывание колпачка со спаем термопары горячими газами с высокой скоростью (>100 м/с), а кварцевый экран, приобретающий температуру просасываемого газа, защищает колпачок от влияния теплового потока излучением окружающих стен. Из показаний отсасывающей термопары (рис. 2) видно, что в дымовой период температура газов при входе в регенератор изменяется от 1087 до 1163 °С на 76 град при среднем значении 1139 °С. В воздушный период горячий воздух изменяет свою температуру от 958 до 905 °С на 53 град при среднем значении 932 °С.

Визуальные наблюдения за развитием факельного процесса в рабочем пространстве печи показали, что образующийся факел сразу после формирования смещается к своду. Такой

Таблица 1. Химический состав исходных материалов, %

Материал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	CaO	MgO	Модуль кислотности, доли ед.
Доменный шлак	36,98	11,32	0,97	1,22	36,86	7,44	1,09
Порфирит	70,87	10,34	2,30	0,36	4,58	3,21	10,42

Таблица 2. Характеристика отходящих из печи газов

Зона отбора пробы	Время отбора от начала дымового периода, мин	Состав газа, %				Коэффициент расхода воздуха, доли ед.
		CO ₂	O ₂	CO	N ₂	
Справа	1	8,8	5,6	0,0	85,6	1,326
	6	8,2	6,6	0,0	85,2	1,411
	11	8,8	5,8	0,0	85,4	1,343
	16	9,0	5,4	0,0	85,6	1,311
Среднее	—	8,7	5,85	0,0	85,45	1,348
Слева	3	8,4	6,0	0,0	85,6	1,343
	8	9,2	5,4	0,0	85,4	1,312
	12	9,0	5,4	0,0	85,6	1,311
	19	9,0	5,4	0,0	85,6	1,311
Среднее	—	8,9	5,55	0,0	85,55	1,319

характер движения газов не может обеспечить равномерного прогрева всей поверхности ванны и связан в основном с низкой кинетической энергией газовых струй.

Результаты исследований температурного поля ванны (рис. 3), полученные по данным инструментальных замеров температуры поверхности расплава с помощью высокотемпературного пирометра «Термоскоп-100ВТ» при расположении факела слева, показывают, что его дальность не превышает половины длины ванны, а отходящие газы заворачиваются в дымоотводящий канал, охватывая не более 45 % площади пода рабочего пространства. Остальная часть ванны характеризуется пониженной температурой (<1500 °С). На фоне относительно высокой температуры ванны вдоль ее боковых поверхностей располагаются зоны с пониженной температурой (1410–1430 °С), в которых производится загрузка исходной шихты.

При отоплении ванн печей природным газом представляется целесообразным увеличение скоростных характеристик факела за счет введения в него дополнительных высокоскоростных струй компрессорного воздуха. В результате турбулизации струйных процессов и повышения их динамических характеристик могут значительно улучшаться процессы перемешивания топлива и воздуха, создания настильного и жесткого газового потока с интенсификацией направленного теплообмена в рабочем пространстве. Практика использования компрессорного воздуха для интенсификации тепломассообменных процессов в ванн печах [12] указывает на возможность снижения расхода топлива при прочих равных условиях на 15–16 %. При этом ожидается увеличение тепловых потоков на ванну на 24–26 %.

Для оценки герметичности газоотводящих каналов печи исследовали изменение состава газов

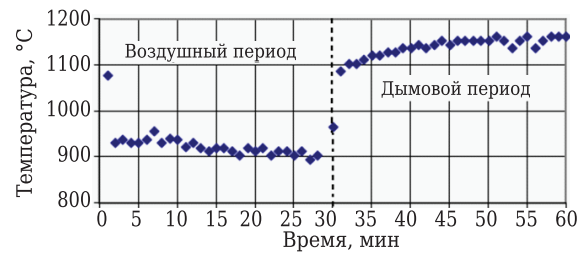


Рис. 2. Изменение температуры газов на входе в печь

после регенератора и перед трубой (табл. 3). Анализ изменений коэффициента расхода воздуха показал, что по мере прогрева насадки дымовыми газами коэффициент расхода воздуха после регенератора возрастает от 1,314 до 1,376, на 4,72 %, за счет подсосов воздуха через его неплотности, количество которого достигает 41,5 %.

Результаты исследований состава газов перед трубой показали, что между изменениями направления движения газов в рабочем пространстве печи в дымовой период подсосы холодного воздуха в отходящих газах первоначально (в течение 10–15 мин) возрастают примерно на 170 м³/ч, а затем в воздушный период снижаются примерно на ту же величину. В среднем же на пути от регенератора до трубы количество подсосов воздуха возрастает на $\frac{1,941-1,34}{1,34} \cdot 100 = 44,85 \%$.

Поверочный расчет регенератора в соответствии с данными [11] показал, что при использовании насадки «Сименс» размерами 120×120 мм количество теплоты воздуха увеличивается на 2896 кВт. При этом температура отходящих газов на выходе из регенератора не превышает 610 °С, а тепловые потери с отводимыми газами составляют не менее 2022 кВт. При среднем коэффициенте теплопередачи в насадке реге-

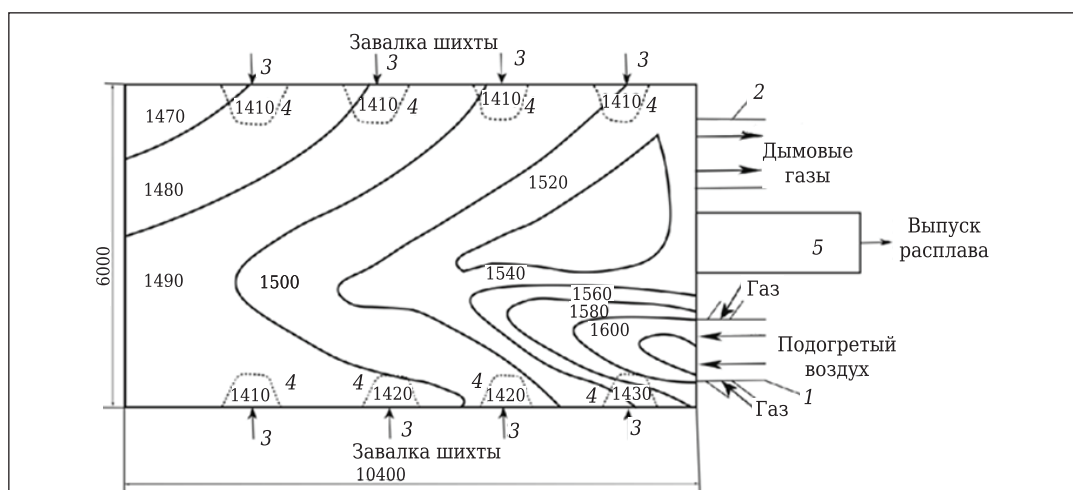


Рис. 3. Температурное поле рабочего пространства ванны печи: 1 — влет горелочного устройства; 2 — газоотводящий канал; 3 — загрузочное устройство; 4 — завалочные кучи шихты; 5 — фидер; цифры у кривых — температура поверхности ванны, °С

Таблица 3. Изменение состава газов в газоотводящем канале

Место отбора пробы	Время отбора после начала дымового периода, мин	Состав газов, %				Коэффициент расхода воздуха, доли ед.	Температура, °С
		CO ₂	O ₂	CO	N ₂		
После регенератора	3	9,6	5,4	0,0	85,0	1,314	570
	8	8,8	5,6	0,0	85,6	1,326	600
	13	8,6	5,8	0,0	85,8	1,345	
	18	8,4	6,2	0,0	85,4	1,376	
Среднее		8,85	5,7	0,0	85,45	1,340	585
Перед трубой	3	6,4	10,4	0,0	83,2	1,888	317
	8	6,0	11,0	0,0	83,0	1,924	367
	13	6,0	11,0	0,0	83,0	1,924	388
	18	6,4	10,4	0,0	83,3	1,886	393
	30	–	–	–	–	–	424
Среднее		6,2	10,7	0,0	83,13	1,941	378

нератора около 4,29 Вт/(м²·К) общая расчетная поверхность теплообмена составляет 1114 м² при объеме кладки 75,27 м³. Сравнение ее с реальным объемом насадки регенератора (86 м³) указывает на хорошее соответствие этих показателей с расчетными данными.

Для установления непроизводительных расходов теплоты, выбора путей снижения энергетических затрат на производство минерального расплава и повышения производительности плавильного агрегата по результатам экспериментальных исследований был составлен тепловой баланс печи по известной методике [11]. В стационарном режиме работы ванной печи проведены исследования мгновенного выхода расплава с использованием мерного ковша. Температуру расплава определяли с помощью погрузочной термопары градуировки ТХА в комплекте с мультиметром типа ДТ 830В и пирометра спектрального излучения типа «Термоскоп-100ВТ». Результаты замеров приведены в табл. 4.

Для определения теплоемкости расплава использовали данные его химического состава и справочные материалы [13]. Потери теплоты через кладку печи вследствие теплопроводности и потерь теплоты с охлаждающей водой устанавливали по выражениям:

$$Q_5 = Q_{5m} + Q_{5охл},$$

$$Q_{5m} = \alpha_F(t_{ст} - t_в)F, \text{ кВт},$$

где α_F — коэффициент теплоотдачи от стенки в окружающую среду. По данным [14], его величину устанавливали по эмпирическим формулам: для вертикальных стен $\alpha_F = 8 + 0,06t_{ст}$; для горизонтальных поверхностей, обращенных

вверх, $\alpha_F = 10 + 0,05t_{ст}$; для горизонтальных поверхностей, обращенных вниз, $\alpha_F = 7 + 0,05t_{ст}$; $t_{ст}$ — средняя температура поверхности стенки, °С; $t_в$ — температура окружающей среды, °С; F — внешняя поверхность печи, м².

$$Q_{5охл} = G_{H_2O} C_{H_2O} (t''_{H_2O} - t'_{H_2O}), \text{ кВт},$$

где G_{H_2O} — средний расход воды, кг/ч (его величину определяли весовым методом с использованием мерной посуды объемом 13 л); t'_{H_2O} и t''_{H_2O} — температура воды на входе в охлаждаемый элемент и выходе из него, °С (температуру воды фиксировали ртутным термометром с точностью 0,5 град).

Теплоту эндотермических реакций при получении минерального расплава определяли как разность между приходом теплоты в рабочее пространство ванной печи и установленными расходными статьями его теплового баланса. По результатам экспериментальных измерений был составлен сводный тепловой баланс рабочего пространства печи (табл. 5).

Результаты исследований показывают, что суммарный тепловой КПД ванной регенеративной печи составляет 24,79 + 14,25 = 39,04 %. Обращает на себя внимание значительная доля тепловых потерь с отходящими газами (49,00 %). С учетом тепла подогретого воздуха общие потери тепла с газами из печи составили 3909,08 – 1698,29 = 2210,79 кВт, или 27,71 % общего прихода тепла, что равносильно 217,36 м³/ч природного газа. Дальнейшая утилизация тепла отходящих газов возможна только при использовании после регенератора дополнительных теплоутилизационных устройств (котел-утилизатор, водяной эконо-

Таблица 4. Результаты исследований расплава

Масса единичной пробы, кг	Время налива, с	Производительность печи по расплаву, кг/ч	Температура		
			по термопаре		по пирометру, °С
			mB	°С	
5,94	3,82	5597,91	54,1	1350	1302, 1377,
5,80	5,18	4030,89	55,2	1382	1449, 1375,
4,12	3,97	3736,02	55,6	1394	1359
Среднее	–	4454,94	–	1375	1384

Таблица 5. Сводный тепловой баланс ванной печи

Приход теплоты			Расход теплоты		
статья	в кВт	в %	статья	в кВт	в %
1. Химическая теплота топлива	6278,82	78,71	1. Физическая теплота расплава	1977,55	24,79
2. Физическая теплота подогрева воздуха	1698,29	21,29	2. Физическая теплота отходящих газов	3909,08	49,00
Всего	7977,11	100	3. Потери теплоты через кладку	783,17	9,82
			4. Потери теплоты с охлаждающей водой	170,39	2,14
			5. Теплота эндотермических реакций на расплавление шлака	1136,72	14,25
			Всего	7977,11	100

майзер). Это мероприятие потребует дополнительной герметизации нижнего строения печи и установки дополнительного оборудования. Потери теплоты через футеровку можно сократить также за счет использования дополнительной теплоизоляции и герметизации рабочего пространства.

Предлагаемые мероприятия потребуют также совершенствования системы КИПиА, поэтому вопрос об их рациональной структуре следует рассмотреть отдельно.

Библиографический список

1. Лисиенко, В. Г. Стекловарение: теплотехника, моделирование, управление и экология / В. Г. Лисиенко, Ю. В. Крючков, С. Н. Гуцин, В. Б. Кутьин. — Екатеринбург : Уральский центр академического обслуживания, 2010. — 452 с.
2. Ярошенко, Ю. Г. Теплофизические основы тепловой работы металлургических слоевых печей и агрегатов: учебное пособие / Ю. Г. Ярошенко, В. С. Швыдкий, Н. А. Спириин [и др.]. — Екатеринбург : АМК «День РА», 2019. — 464 с.
3. Зобнин, Б. Ф. Нагревательные печи / Б. Ф. Зобнин. — М. : Машиностроение, 1964. — 311 с.
4. Волгина, Ю. М. Теплотехническое оборудование стекольных заводов / Ю. М. Волгина. — М. : Стройиздат, 1982. — 276 с.
5. Батищев, В. Е. Энергосбережение : справ. пособие / В. Е. Батищев, Б. Г. Мартыненко, С. Л. Сысков, Я. М. Щелоков. — Екатеринбург : Энерго-пресс, 2000. — 338 с.
6. Лисиенко, В. Г. Хрестоматия энергосбережения : справ. изд. В 2 кн. / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев ; под ред. В. Г. Лисиенко. — М. : Теплотехник, 2005. — 768 с.
7. Войнов, А. П. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты / А. П. Войнов, В. А. Зайцев, Л. И. Курперман, Л. Н. Сидельников ; под ред. Л. Н. Сидельникова. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 272 с.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования тепловой работы ванной печи для получения минерального расплава показали, что:

- ▶ сжигание природного газа в рабочем пространстве печи производится с высоким коэффициентом расхода воздуха при полном отсутствии химического недожога, что связано, по-видимому, со значительными неконтролируемыми и неуправляемыми подсосами из окружающей среды через отверстия и неплотности футеровки при работе печи на самотяге;

- ▶ при отоплении ванн печей представляется целесообразным увеличение скоростных характеристик факела. Это может быть реализовано за счет правильной организации процессов сжигания топлива с использованием дополнительной принудительной подачи воздуха от отдельного вентилятора на горелочные устройства [12];

- ▶ газоплотность регенератора можно считать удовлетворительной. По мере транспортировки дымовых газов от регенератора до трубы количество подсосов возрастает на 44,85 %;

- ▶ отходящие от регенератора газы характеризуются относительно высокой температурой (570–600 °С) и значительным запасом тепла (до 2022,09 кВт), что требует их утилизации с установкой котла-утилизатора или экономайзера. При этом возможно получение горячей воды или пара в количестве 2–3 т/ч при давлении не более 8 кПа;

- ▶ исследования теплового баланса печи свидетельствуют о работе ее с тепловым КПД 39,04 %, что для ванн печей такого типа считается вполне удовлетворительным.

8. Козлов, А. С. Теплотехника регенеративных стекловаренных печей / А. С. Козлов. — М. : Легпромбытиздат, 1990. — 144 с.

9. Лисиенко, В. Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование : справ. изд. В 3 кн. / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев ; под ред. В. Г. Лисиенко. — М. : Теплотехник, 2004. — 832 с.

10. Курочкин, Б. Н. Теплотехнические испытания мартовских печей / Б. Н. Курочкин. — М. : Металлургия, 1972. — 208 с.

11. Китаев, Б. И. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б. И. Китаев, Б. Ф. Зобнин, В. Ф. Ратников [и др.]. — М. : Металлургия, 1970. — 528 с.

12. Гуцин, С. Н. Моделирование и управление тепловой работой стекловаренных печей / С. Н. Гуцин, В. Г. Лисиенко, В. Б. Кутьин. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 1997. — 398 с.

13. Ладыгичев, М. Г. Сырье для черной металлургии : справ. изд. В 2 т. / М. Г. Ладыгичев, В. М. Чижикова, В. И. Лобанов [и др.]. — М. : Машиностроение, 2001. — 896 с.

14. Воронов, Г. В. Конструирование и расчет сушильных печей и установок литейного производства / Г. В. Воронов, С. Н. Гуцин, М. Д. Казиев [и др.]. — Екатеринбург : ГОУ УГТУ-УПИ, 2002. — 264 с. ■

Получено 11.03.21

© В. И. Матюхин, А. В. Матюхина, Э. Г. Кох, 2021 г.