

УДК 66.041.3-65:658.589

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЬНО-СПУСКОВЫХ ПЕЧЕЙ С НОВОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Проведен анализ способов повышения энергоэффективности электрических модульно-спусковых печей для обжига вермикулита. Первый способ сводится к анализу энергоэффективности исходной шестимодульной печи с излучателями тепловой энергии из П-образного нихрома и структурной трансформации печного агрегата с переустановкой наименее эффективного нижнего модуля в параллельное соединение с верхним, максимально эффективным. Так образуется печь с последовательно-параллельным сопряжением модулей (ППС-печь). Второй способ, предложенный в предшествующих работах автора, основан на применении новых нагревательных систем с верхним расположением проволочных излучателей с круглым сечением, закрепленных на термодышках из керамовермикулитовых плит. Оба эти способа, реализованные в модифицированных ППС-печах, дают синергетический эффект со снижением удельной энергоемкости обжига вермикулитовых концентратов в шестимодульной ППС-печи до 105,9 мДж/м³, а в четырехмодульной с применением «нулевого» неэлектрифицированного модуля до 63,5 мДж/м³.

Ключевые слова: электрическая модульно-спусковая печь, шестимодульная печь, подвесная нагревательная система, излучатели тепловой энергии, удельная энергоемкость обжига.

ВВЕДЕНИЕ

Обжиг сыпучих материалов — широко распространенная технология обработки для придания им полезных целевых свойств. Так, за несколько секунд частицы вермикулитового концентрата, подвергаясь высокотемпературной обработке, например в электрической модульно-спусковой печи, изменяются от изначально плоских зерен до объемных с пространственно-щелевидной структурой [1]. После такой трансформации вермикулит становится отличным теплоизоляционным материалом, оставаясь негорючим, химически и биологически инертным. Однако эта технология энергоемка, поэтому работа по совершенствованию этих и других типов электрических печей для обжига вермикулитовых концентратов, наиболее экологически чистых и безопасных, пока продолжается.

Обоснована [2] более высокая энергоэффективность нагревательной системы с верхним расположением излучателей, закрепленных на спецподвесках под термодышками из ке-

рамовермикулитовых плит, обладающих высокой прочностью и малой теплопроводностью [3]. Как будет показано ниже, электрические модульно-спусковые печи с последовательно-параллельным соединением модулей обжига (ППС-печи) намного эффективнее своих предшественниц с нагревательной системой, состоящей из вытянутых вдоль модулей П-образных электрических излучателей из ленточного нихрома, расположенных на огнеупорном основании модулей печи [4].

Цель настоящей работы — повышение энергоэффективности электрических модульно-спусковых печей за счет синергетического эффекта — введения в конструкцию агрегата новой нагревательной системы, структурного изменения за счет иного сопряжения электрифицированных модулей и оптимизации их количества.

ИЗМЕНЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДУЛЬНО-СПУСКОВОЙ ПЕЧИ

В качестве опытно-промышленной печи-аналога примем исходную шестимодульную печь [5] (рис. 1), в корпусе 1 которой размещены относительно узкие (0,69 м) и короткие (0,297 м) модули обжига 2, сопряженные в зонах пере-сыпания материала 3 последовательно сверху вниз. В верхней части печи расположены бункер



А. И. Нижегородов
E-mail: nastromo_irkutsk@mail.ru

сырья 4, спусковой лоток 5 и привод 6 барабана дозатора 7. Печь показана в производственном помещении со специально снятыми термокрышками, поэтому видны ленточные нихромовые излучатели, раскаленные до 720–750 °С.

Результаты аналитических исследований шестимодульных печей с укороченными модулями обжига показали их прогнозную удельную энергоемкость 188–195 мДж/м³ [5], а испытания опытно-промышленного образца дали результат около 197 мДж/м³. При испытаниях для взвешивания брали пробы вспучивающегося вермикулита из зон пересыпания 3 для определения насыпной плотности ρ , кг/м³; средние по трем пробам данные для каждого модуля приведены в табл. 1 [5].

Рассмотрим данные четвертой колонки (см. табл. 1), как наиболее информативные. Изменение насыпной плотности вермикулита после прохождения концентрата через верхний модуль 1 обжига составляет 402 кг/м³. На модулях 2 и 3 плотность снижается дополнительно на 91 и 34 кг/м³ соответственно. Модули 4–6 вносят весьма скромный вклад: все вместе изменяют плотность только на 24 кг/м³. Следует отметить, что общая потребляемая мощность рассматриваемой опытно-промышленной печи составляла 75 кВт, следовательно, на каждый модуль приходится по 12,5 кВт. Относительное изменение плотности на первом модуле 1 равно 32,16 кг/(м³·кВт), на последнем модуле 6 0,16 кг/(м³·кВт). Очевидно, что энергоэффективность модуля 1 в 200 раз выше! В то же время, отнеся изменение плотности на нижнем модуле 6 $\Delta\rho = 2$ к общему ее изменению в печи $\Delta\rho = 660 \div 109$, получим 0,0037, или 0,27 % изменения плотности.

Процессы выхода химически связанной воды и вспучивания являются следствием теплоусвоения вермикулитом мощности лучистых потоков нагревательной системы, поэтому можно сказать, что нижний модуль 6 исходной шестимодульной печи был бы просто не нужен, если его не перенести наверх и не установить параллельно с первым верхним модулем 1 (рис. 2).

Электропечь содержит последовательно сопряженные модули обжига 1, 2, 3, 4 и 5 и параллельно сопряженный с модулем 1 модуль 6, который в простой шестимодульной печи располагался внизу под модулем 5. Вермикулитовый концентрат подается в зоны пересыпания *a* и *b* барабанным дозатором (на рис. 2 не показан) и, скатываясь по огнеупорным основаниям модулей, продвигается с пересыпанием в зонах *c*, *d*, *e* и *f* в тепловом поле проволочных излучателей 7, закрепленных под термокрышками 8 на спецподвесках 9 и крепежных головках 10. Все элементы печи встроены в остов 11, со всех сторон закрытый съемными панелями 12.

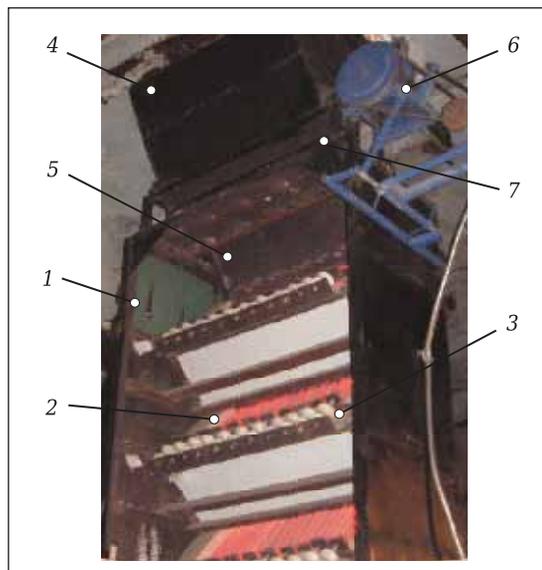


Рис. 1. Исходная шестимодульная печь с последовательным сопряжением модулей

Таблица 1. Средние значения плотности проб вермикулита из ковдорского сырья КВК-2

Модуль (сверху вниз)	Плотность, кг/м ³		Изменение $\Delta\rho$, на модуле, кг/м ³
	на входе в модуль $\rho_{вх}$	на выходе из модуля $\rho_{вых}$	
1	660	258	402
2	258	167	91
3	167	133	34
4	133	116	17
5	116	111	5
6	111	109	2

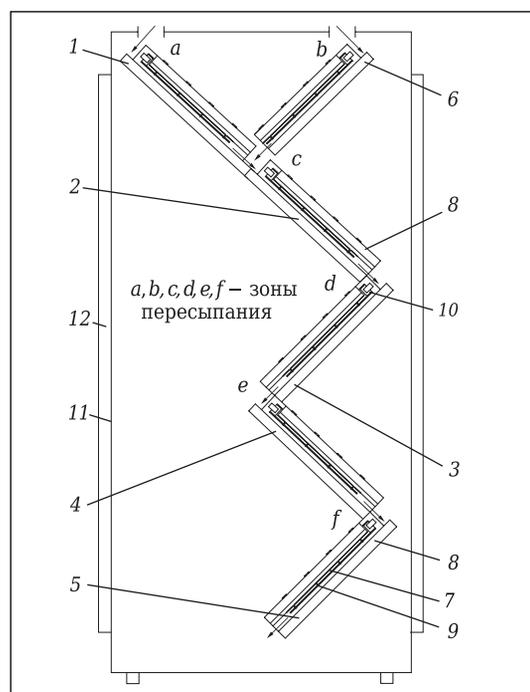


Рис. 2. Схема измененной шестимодульной печи

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗМЕНЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДУЛЬНО-СПУСКОВОЙ ПЕЧИ

Мощность поглощения лучистой энергии от излучателей Q_r , Вт, [2] и удельная энергия теплопоглощения θ , Вт, связаны выражением [5]:

$$\theta \cdot P_G = Q_m, \tag{1}$$

где P_G — массовая производительность печного агрегата, кг/с, равная

$$P_G = m/t, \tag{2}$$

где m — суммарная масса всего вермикулитового концентрата, движущегося в тепловом поле модулей обжига печи, кг; t — время обжига, с.

Мощность Q_m , Вт, выражается формулой [2]:

$$Q_r = 2\sigma T_n^4 f_n \varepsilon_n (1 + \alpha_b \varphi_{12}) \cdot \frac{1}{3} (2\varphi_1 + \varphi_2), \tag{3}$$

или в более компактном виде:

$$Q_m = \Omega \varepsilon_n \sigma T_n^4, \tag{4}$$

где Ω — комплексный параметр, учитывающий оптико-геометрические характеристики рабочего пространства в модуле обжига, излучателей и самого вермикулита; σ — постоянная Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) [7]; T_n — температура на поверхности излучателей нагревательной системы, К; f_n — полная площадь поверхности всех нагревателей печи, м²; ε_n — степень черноты нихрома, $\varepsilon_n = 0,96$ [6]; α_b — поглощающая способность вермикулита, $\alpha_b = 0,768$ [8]; φ_{12} — угловой коэффициент для потоков мощности соседних излучателей, $\varphi_{12} = 0,032$ [2]; φ_1 и φ_2 — угловые коэффициенты для потоков мощности от излучателей слева и справа до вермикулитового зерна в его крайних положениях [2], $\varphi_1 = 0,064$ и $\varphi_2 = 0,42$.

С учетом формул (2) и (4) выражение (1) примет следующий вид:

$$\theta \frac{m}{t} = \Omega \varepsilon_n \sigma T_n^4.$$

Для шестимодульной печи с измененной структурой (см. рис. 2) уравнение баланса мощностей на двух верхних модулях будет иметь вид:

$$\theta_1 \frac{m_1}{t_1} = \Omega_1 \varepsilon_n \sigma T_n^4, \tag{5}$$

а на последующих четырех —

$$\theta_2 \frac{m_2}{t_2} = 4\Omega_2 \varepsilon_n \sigma T_n^4, \tag{6}$$

где m_1 и m_2 — массы вспучивающегося вермикулита, кг, одновременно находящегося на двух верхних модулях 1 и 6 (см. рис. 2) и на остальных нижних 2–5 соответственно; t_1 и t_2 — время движения вермикулита по верхним и нижним модулям соответственно, с; Ω_1 и Ω_2 — параметры, учитывающие оптико-геометрические свойства пространства обжига вермикулита и излучате-

лей: f_{n1} — площадь излучающих поверхностей модулей 1 и 6, м²; f_{n2} — площадь излучающих поверхностей остальных модулей печи, верхних модулей и самого вермикулита, м²; φ_{12} , φ_1 , φ_2 — ранее упомянутые угловые коэффициенты.

В формулах (5) и (6) комплексные параметры Ω и Ω_1 не учитывают отраженные лучистые потоки от огнеупорного основания и термокрышки модуля, поскольку не превышают 10 % падающих потоков, идущих от излучателей [5]. К тому же это значительно упрощает решение задачи.

При симметричной схеме соединения верхних модулей (см. рис. 2) длины излучателей и самих модулей равны, а также равны температуры на всех излучателях печи. С учетом этого запишем выражения (5) и (6) в виде

$$\theta_1 = \frac{\Omega_1}{m_1} 2\varepsilon_n \sigma T_n^4 t_1, \tag{7}$$

$$\theta_2 = 4 \frac{\Omega_2}{m_2} \varepsilon_n \sigma T_n^4 t_2, \tag{8}$$

а затем, суммируя выражения (7) и (8), получим выражение удельной энергии теплопоглощения вермикулита для печи в целом θ , Дж/кг:

$$\theta = \varepsilon_n \sigma T_n^4 \left(2\Omega_1 \frac{t_1}{m_1} + 4\Omega_2 \frac{t_2}{m_2} \right). \tag{9}$$

Решим уравнение (9) относительно температуры излучающих поверхностей T_n , К:

$$T_n = \left\{ \theta \left[\varepsilon_n \sigma \left(2\Omega_1 \frac{t_1}{m_1} + 4\Omega_2 \frac{t_2}{m_2} \right) \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{4}}, \tag{9}$$

или

$$T_n = \left\{ \theta \left[2\Omega_1 \varepsilon_n \sigma \frac{12(1-k_n)k_b t_1}{\pi BD(l+\zeta)} + 4\Omega_2 \varepsilon_n \sigma \frac{6,75(1-k_n)k_b t_2}{\pi BD(4l+3\zeta)} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{4}}, \tag{10}$$

где

$$m_1 = \frac{\pi BD(l+\zeta)}{12(1-k_n)k_b}, \tag{11}$$

$$m_2 = \frac{\pi BD(4l+3\zeta)}{6,75(1-k_n)k_b}, \tag{12}$$

где k_n — коэффициент пористости, $k_n \sim 0,35$; k_b — коэффициент вспучивания, $k_b \sim 0,0085$ м³/кг [5].

Формулы (11) и (12) получены при энергетическом анализе ППС-печи с ленточными излучателями П-образной формы, установленными на ребро и образующими продольные камеры печи-аналога (см. рис. 1) [5] при примерном соотношении $\lambda \approx D$ на верхних модулях и $\lambda \approx 0,5D$ на последующих, в которых потоки верхних модулей суммируются (λ — среднее расстояние между отдельными зернами вермикулита). При использовании подвесных проволочных излучателей пропускная способность модулей

ППС-печи вполне может быть удвоена, так как камеры, создававшие стесненные условия для потока вермикулита и скученность зерен в зонах пересыпания, теперь отсутствуют и перегорание излучателей из-за резкого снижения отвода от них тепла исключено. При этом если принять равенства $\lambda \approx 0,5D$ на верхних модулях и $\lambda \approx 0,25D$ на последующих, что соответствует примерно удвоению подачи концентрата, то в формулах (11) и (12) появляются коэффициенты 12 и 6,73 вместо 24 и 13,5 в печах с «нижней» нагревательной системой [5].

В выражении (10) $T_{и}$ является функцией времени обжига, определяемого суммой $t_1 + t_2$, и если построить соответствующую номограмму (рис. 3), то для заданной $T_{и}$ можно определять время обжига с учетом его зависимости от суммарной длины модулей. При изменении конструкции печи для настройки на рабочие температуры необходима корректировка по силе тока в системе электропитания печи.

В данном случае задача состоит в том, чтобы сравнить, как сильно влияет упомянутый ранее синергетический эффект на удельную энергоемкость электрических модульно-пусковых печей с измененной структурой и новой конструкцией нагревательной системы. Примем конструктивные размеры исследуемой ППС-печи, как у печи-аналога [5]: ζ — длина зоны пересыпания (0,06 м); B — ширина модуля (0,69 м); l — длина модуля, находящаяся в зоне теплового излучения (0,297 м). Сечение проволочного излучателя 8 мм² и количество излучателей $n = 8$ шт. (используются при расчете площадей поверхности излучателей $f_{и1}$ и $f_{и2}$, входящих в параметры Ω_1 и Ω_2), время обжига 2,396 с.

Произведя расчет температуры по формуле (10) при указанных здесь и выше значениях, получим 1014 К, или 741 °С. Для определения температуры вермикулита $T_{вер}$, К, по зависимости от температуры проволочных излучателей воспользуемся формулой, полученной в работе [2]:

$$T_{вер} = T_{и} \sqrt[4]{\frac{f_{и}}{f_{в}} \alpha_{в} \varepsilon_{и} (1 + \rho_{и} \varphi_{и2}) \cdot \frac{2}{3} (2\varphi_1 + \varphi_2)}.$$

Средняя температура вспученного вермикулита в потоке на выходе из печи при вышеприведенных исходных данных будет равна 533 °С.

Экспериментально доказано [9], что качественное вспучивание вермикулита за время обжига 2,4–3,0 с (в зависимости от размера исходного концентрата) происходит при его температуре не ниже 510 °С. Полученное значение указывает на гарантированный полноценный обжиг материала со средним размером зерен 2 мм.

Для расчета объемной производительности Π_V , м³/с, модифицированной ППС-печи воспользуемся формулой (12) для нижних четырех модулей, по которым идет суммарный верми-

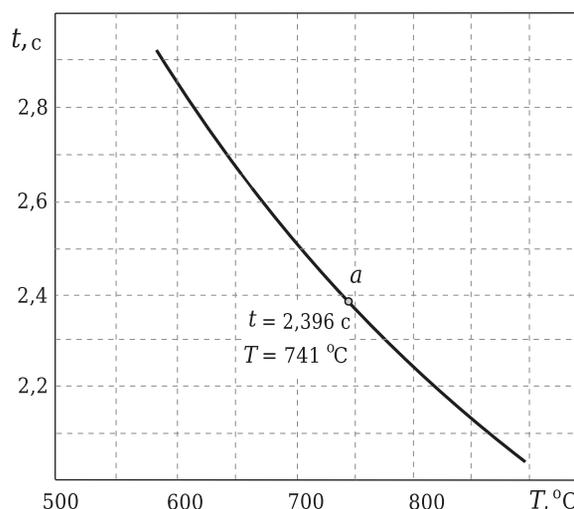


Рис. 3. Номограмма для определения времени обжига по температуре излучателей

кулитовый поток, но без учета коэффициента вспучивания:

$$\Pi_V = \frac{\pi BD(4l + 3\zeta)}{6,75(1 - \kappa_n)t}. \quad (13)$$

Для концентрата Ковдорского месторождения КВК-2 со средним условным диаметром вспученного зерна 2 мм и с учетом вышеприведенных параметров и коэффициентов расчет по формуле (13) дает значение Π_V 0,00071 м³/с, или 2,56 м³/ч.

Опытно-промышленный образец (печь-аналог), показанный на рис. 1, при работе на ковдорском концентрате обеспечивал производительность 1,16 м³/ч [5]. Следовательно, прогнозная производительность модифицированной ППС-печи будет в 2,2 раза больше. Это очень хороший результат.

Произведем расчет удельной энергоемкости обжига e_y , Дж/кг, того же концентрата:

$$e_y = \frac{N}{\Pi_V} = \frac{3IU}{\Pi_V}, \quad (14)$$

где N — электрическая мощность, потребляемая печным агрегатом в целом, Вт; I и U — сила тока и линейное напряжение в питающей сети для опытно-промышленной печи-аналога, равные 113,9 А и 220 В [5].

Подставляя величины I , U и Π_V в формулу (14), получим значение удельной энергоемкости 105,9 мДж/м³. Исходная ППС-печь-аналог обеспечивала энергоемкость 196 мДж/м³ [5], что в 1,85 раза больше. Столь значительное снижение энергоемкости процесса модифицированной ППС-печи достигнуто путем изменения ее конструкции — установкой нижнего малоэффективного модуля в параллельное соединение с верхним модулем 1 и переносом излучателей (проволочных вместо ленточных) под термокрышку. При этом обеспе-

чивается более эффективное покрытие вспучивающегося вермикулита тепловым излучением из-за отсутствия продольных камер в прежней печи-аналоге. Это сочетание привело к синергетическому эффекту, на который и рассчитывал автор настоящей статьи.

Однако есть дополнительные возможности, вытекающие из анализа распределения насыпной плотности вермикулита по зонам пересыпания исходной шестимодульной печи, проведенного на основе экспериментальных данных (см. табл. 1) [5]. В табл. 2 приведены аналогичные данные по опытно-промышленной ППС-печи [5]. Изменение насыпной плотности вермикулита после прохождения по модулям 1 и 6 (см. рис. 2) составляет 487 кг/м^3 (см. табл. 2). На модуле 2 $\Delta\rho_v = 40 \text{ кг/м}^3$, а на последующих 14, 7 и 2 кг/м^3 ,

Таблица 2. Средние значения плотности проб вермикулита из ковдорского сырья КВК-2

Модуль (сверху вниз)	$\rho_{\text{вх}}, \text{ кг/м}^3$	$\rho_{\text{вых}}, \text{ кг/м}^3$	$\Delta\rho_v, \text{ кг/м}^3$
1	660	173	487
2	173	133	40
3	133	119	14
4	119	112	7
5	112	110	2

и они вносят незначительный вклад в процесс вспучивания — в сумме снижают плотность только на 23 кг/м^3 от исходной 660 кг/м^3 .

ЧЕТЫРЕХМОДУЛЬНАЯ МОДИФИЦИРОВАННАЯ ППС-ПЕЧЬ

При общей электрической мощности N_m опытно-промышленной ППС-печи-аналога $72,5 \text{ кВт}$ [5]

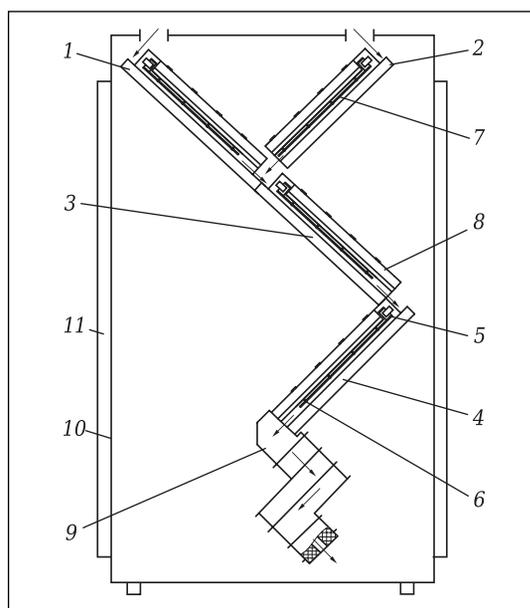


Рис. 4. Четырехмодульная ППС-печь с верхним расположением излучателей под термокрышками; обозначения — в тексте

на каждый модуль приходится по $12,08 \text{ кВт}$. Относительное изменение плотности на модулях 1 и 6 $\Delta\rho_v/N_m$ составляет $39,6 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{кВт})$, на модуле 2 $3,3 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{кВт})$; $\Delta\rho_v$ остальных модулей: на модуле 5 $0,17$, на модуле 4 $0,58$, на модуле 3 $1,16 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{кВт})$. Очевидно, что нижние модули 4 и 5 малоэффективны и их следует убрать из конструкции новой модифицированной ППС-печи, а суммарное недостающее изменение плотности на них (9 кг/м^3) легко восполнит «нулевой» модуль, что было доказано теоретически и экспериментально в предыдущих работах [10, 11]. Тогда конструкция ППС-печи с новой подвесной излучательной системой будет четырехмодульной (рис. 4).

Четырехмодульная печь с последовательно-параллельным сопряжением модулей 1, 2, 3 и 4 содержит крепления 5 и спецподвески 6, удерживающие излучатели 7 нагревательной системы, расположенные под термокрышками 8 в верхней части модулей. Вермикулитовый концентрат подается в зоны пересыпания верхних модулей 1 и 2 барабанным дозатором (на рис. 4 не показан) и движется сплошным потоком по огнеупорным основаниям модулей, пересыпаясь с одного модуля на другой, пока, будучи частично недовспученным, не поступит в «нулевой» модуль 9. Все элементы печи встроены в остов 10, со всех сторон закрыты съемными панелями 11. Модуль 9 представляет собой хорошо теплоизолированный ломаный щелевидный канал, по которому вермикулит движется дополнительно еще примерно $1,5\text{--}1,8 \text{ с}$ в стесненных условиях. При этом мелкие и средние зерна, успевшие нагреться до $510\text{--}520 \text{ }^\circ\text{C}$ и в которых процессы дегидратации и структурообразования уже завершились [10], передают накопленную внутреннюю энергию недовспученным крупным зернам не только через тепловое излучение, но и кондуктивным путем [12].

В работах [10, 11] теоретически обоснована и экспериментально доказана эффективность использования «нулевых» модулей для завершения дегидратации и механического вспучивания вместо электрических, расположенных в нижней части печи и имеющих минимальные значения коэффициента эффективности энергоусвоения.

Четырехмодульная ППС-печь с «нулевым» модулем при неизменной производительности $2,56 \text{ м}^3/\text{ч}$ будет потреблять $48,3 \text{ кВт}$ и в соответствии с формулой (14) удельная энергоемкость обжига концентратов ковдорского сырья составит $63,5 \text{ мДж/м}^3$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный результат — снижение удельной энергоемкости процесса обжига вермикулита в модифицированном энерготехнологическом

ППС-печном агрегате до $63,5 \text{ мДж/м}^3$ — достигнут за счет радикальных конструктивных изменений.

Первое сводится к разработке тепловой системы печи из набора проволочных нихромовых излучателей лучистой энергии с их верхним расположением и закреплением под термокрышками модулей обжига. Такая система оказалась существенно эффективнее прежней, состоявшей из П-образных камер из ленточного нихрома со всеми ее недостатками [2]. Она способна значительно увеличить пропускную способность печи, практически удвоив подачу концентрата в печь, и ее производительность.

Второе, более существенное конструктивное изменение, но возможное только при использовании подвесной излучательной системы, — это структурная трансформация исходной простой шестимодульной печи [5]. При этом нижний

наименее эффективный модуль обжига устанавливается в параллельное соединение с первым верхним модулем, преобразуя исходную шестимодульную печь в печь с последовательно-параллельным соединением модулей (ППС-печь) с последующим удалением двух нижних модулей и получением четырехмодульной печи с дополнительным «нулевым» неэлектрифицированным модулем.

Эти меры дали синергетический эффект модификации исходного печного агрегата со снижением удельной энергоемкости от исходной $195 [5]$ до $63,5 \text{ мДж/м}^3$ на 67 %. Полученный результат впечатляет, но он основан на аналитической модели, точность которой позволит определить комплекс испытаний на разных типах вермикулитовых концентратов в новой опытной печи или на лабораторной физической модели.

Библиографический список

1. **Nizhegorodov, A. I.** Methods and limits for improving the energy efficiency of modular-pouring electrical furnaces for firing vermiculite. Transitioning to a new concept / A. I. Nizhegorodov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2017. — Vol. 57, № 6. — P. 585–590.
Нижегородов, А. И. Пути и пределы повышения энергоэффективности электрических модульно-спусковых печей для обжига вермикулита. Переход к новой концепции / А. И. Нижегородов // *Новые огнеупоры.* — 2016. — № 12. — С. 13–18.
2. **Нижегородов, А. И.** Моделирование переноса лучистой энергии на сыпучую среду в электропечах с верхним положением излучающих элементов / А. И. Нижегородов // *Новые огнеупоры.* — 2020. — № 2. — С. 10–14.
3. **Ахтямов, Р. Я.** Вермикулит — сырье для производства огнеупорных теплоизоляционных материалов / Р. Я. Ахтямов // *Огнеупоры и техническая керамика.* — 2009. — № 1/2. — С. 59–64.
4. **Nizhegorodov, A. I.** Electric modular-trigger kiln with an energy recuperation system for firing vermiculite concentrates / A. I. Nizhegorodov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2016. — Vol. 56, № 5. — P. 470–475.
Нижегородов, А. И. Энергоэффективная электрическая печь с выдвижной подовой платформой для обжига вермикулита / А. И. Нижегородов // *Новые огнеупоры.* — 2017. — № 2. — С. 19–24.
5. **Нижегородов, А. И.** Энерготехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов / А. И. Нижегородов, А. В. Звездин. — Иркутск : Изд-во ИРНТУ, 2015. — 250 с.
6. **Кутателадзе, С. С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справ. пособие / С. С. Кутателадзе. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 367 с.
7. **Кошкин, Н. И.** Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. — М. : Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1972. — 256 с.
8. **Zvezdin, A. V.** Analytical model of absorption-reflection properties of vermiculite under thermal / A. V. Zvezdin, T. B. Bryanskikh, A. I. Nizhegorodov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2017. — Vol. 57, № 1. — P. 19–24.
Звездин, А. В. Аналитическая модель поглощательно-отражательной способности вермикулита в условиях теплового излучения / А. В. Звездин, Т. Б. Брянских, А. И. Нижегородов // *Новые огнеупоры.* — 2017. — № 1. — С. 15–20.
9. **Нижегородов, А. И.** Уточненная модель теплоусвоения вермикулита при обжиге в электрических печах с учетом новых экспериментальных данных / А. И. Нижегородов, А. В. Звездин, Т. Б. Брянских // *Строительные материалы.* — 2017. — № 3. — С. 96–99.
10. **Nizhegorodov, A. I.** Transformation of vermiculite energy into mechanical transformation energy during firing in electric furnaces with «zero» module / A. I. Nizhegorodov, A. V. Zvezdin // *Refract. Ind. Ceram.* — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 239–245.
Нижегородов, А. И. Преобразование эксергии вермикулита в энергию его механической трансформации при обжиге в электропечах с «нулевым» модулем / А. И. Нижегородов, А. В. Звездин // *Новые огнеупоры.* — 2016. — № 5. — С. 19–25.
11. **Nizhegorodov, A. I.** Study of an electric furnace physical model for firing vermiculite with a «zero» module / A. I. Nizhegorodov, A. V. Zvezdin // *Refract. Ind. Ceram.* — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 246–251.
Нижегородов, А. И. Исследование физической модели электрической печи для обжига вермикулита с «нулевым» модулем / А. И. Нижегородов, А. В. Звездин // *Новые огнеупоры.* — 2016. — № 6. — С. 13–18.
12. **Крейт, Ф.** Основы теплопереноса : пер. с англ. / Ф. Крейт, У. Блэк. — М. : Мир, 1983. — 512 с. ■

Получено 26.11.19

© А. И. Нижегородов, 2020 г.