

Д. т. н. А. И. Нижегородов (✉)

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия

УДК 66.041.3-65:658.589

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВУХМОДУЛЬНЫХ СПУСКОВЫХ ПЕЧЕЙ С ВЕРХНЕЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

Рассмотрена новая модифицированная двухмодульная электрическая модульно-спусковая печь с верхней нагревательной системой нагревателей и дополнительным «нулевым» (неэлектрифицированным) модулем. За счет исключения нижнего, третьего модуля обжига достигнуто снижение потребления электроэнергии на треть по сравнению с трехмодульной печью-прототипом. В модулях применены подвесные излучательные элементы, которые не только энергетически эффективнее прежних, выполненных из полосовых нагревателей, но и конструктивно обеспечивают за счет подвески под термокрышками удвоенную пропускную способность печи. Это приводит к удвоению ее производительности. Все в целом дает снижение удельной энергоемкости обжига вермикулита в новой двухмодульной печи до уровня 50,4 Дж/м³.

Ключевые слова: двухмодульная электрическая печь, верхняя нагревательная система, подвесные излучательные элементы, пропускная способность печи, энергоемкость.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция электрических модульно-спусковых печей для обжига вермикулита воплотилась в 2003 г.; первая публикация об этом [1] появилась в 2007 г. Применение на иркутском предприятии «Квалитет» несовершенных двух-трехмодульных печей показало, что по удельной энергоемкости (240–250 мДж/м³) они превосходили применявшиеся для этих целей огневые печи, работающие на углеводородном топливе [2]. Дальнейшее совершенствование этой концепции прошло через шестимодульные конструкции (235 мДж/м³) печи с последовательно-параллельным сопряжением модулей (196 мДж/м³) [3] и, наконец, появилась печь с дополнительным «нулевым» модулем, не содержащим источника теплового излучения [4] и весьма эффективным с энергетической точки зрения [5].

В производстве вспученного вермикулита в этих печах применялась нагревательная система с нижним расположением излучателей лучистой энергии, которая представляла собой последовательно соединенные вытянутые вдоль

модулей обжига П-образные нагреватели, уложенные на огнеупорные поверхности модулей и образующие продольные камеры со стенками из ленточного нихрома высотой 8–10 мм. Это и было одной из причин перехода к альтернативной концепции более сложных печей с подвижными подовыми платформами [6], так как в зонах пересыпания вспучивающегося вермикулита с одного модуля на другой образовывалась скученность зерен, которые укладывались в 2–3 ряда и перекрывали по высоте ленточные нагреватели. Это приводило к перегреву и перегоранию нагревателей из-за резкого снижения отвода от них тепла в этих зонах. Попытки увеличить производительность модульно-спусковых печей за счет большей подачи сырья приводили к отказу печных агрегатов, поэтому их производительность P_v составляла 1,5–1,75 м³/ч при разных видах и размерах зерен вермикулитового концентрата.

Переход от нижней нагревательной системы с ленточными нагревательными элементами к верхней (подвесной из проволочного нихрома), размещенной не на огнеупорной поверхности модуля, а над ней, закрепленной под термокрышкой модуля, позволило решить проблему ограничения подачи в печь вермикулитового концентрата.

Цель настоящей работы — увеличение производительности модульно-спусковых печей по сравнению с печью-прототипом как минимум в 2 раза



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

за счет применения в модулях обжига нагревательных систем с верхним расположением излучателей лучистой энергии и организации движения вермикулита в них более плотным потоком.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСХОДНОЙ И НОВОЙ МОДУЛЬНО-СПУСКОВЫХ ПЕЧЕЙ

На рис. 1 показаны схемы электрических модульно-спусковых печей: исходной трехмодульной концепции (печь-прототип) и новой модифицированной модульно-спусковой печи, включающие дополнительный «нулевой» (неэлектрифицированный) модуль. Печные агрегаты (см. рис. 1, а, б) имеют одинаковые дозаторы вермикулитового концентрата 1 со спусковыми лотками 2, с которых сырье по мере вращения барабанов ссыпается в зону подачи на поверхность верхних модулей обжига 3. Вермикулитовый концентрат движется под действием сил тяжести частиц в закрытом пространстве, образованном огнеупорными основаниями модулей 3 и термокрышками 4, пересыпаясь с одного модуля на другой с потерей скорости и

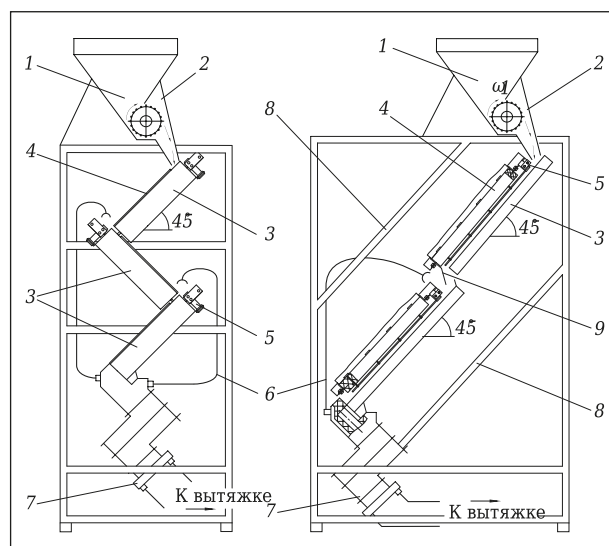


Рис. 1. Модульно-спусковые печи исходной концепции (а) и новой модифицированной с верхней нагревательной системой и двумя электрифицированными модулями обжига (б)

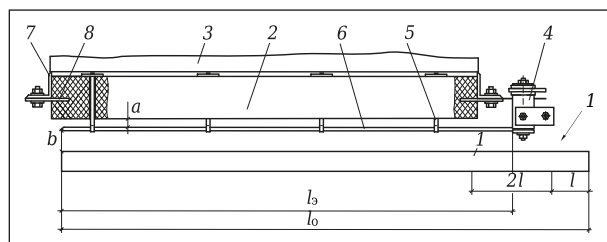


Рис. 2. Верхняя нагревательная система новой модифицированной печи

последующим ее набором на расположенном ниже модуле. Это прерывисто-разгонное движение неуправляемо, приводит к образованию скученности частиц (зерен) вермикулита в зонах пересыпания и появлению все возрастающих интервалов между ними по мере разгона и продвижения к нижним кромкам модулей. Это и было одним из ограничений повышения производительности и вообще совершенствования модульно-спусковых печей. Но появилась верхняя подвесная нагревательная система, состоящая из последовательно соединенных электронагревателей из проволоочного нихрома, удерживаемых крепежными головками 5 (см. рис. 1, б) и зацепленными за термокрышку 4 серьгами 5, расположенными вдоль нагревательных элементов 6 (рис. 2) [8]. Нагревательная система позволила в значительной степени снять ограничение на подачу сырья дозатором и увеличить пропускную способность печи.

Для работы «нулевых» дополнительных модулей 7 (см. рис. 1) используют всасыватели 6 горячего воздуха, выходящего из-под термокрышек 4 [4, 5]. Для уменьшения тепловых потерь модули обжига в новой печи помещены между термоизолированными съемными панелями 8. В зоне пересыпания с верхнего модуля на нижний для гашения скорости установлен отбойник 9, который заставляет вспучивающийся вермикулит вновь разгоняться на нижнем модуле, что увеличивает общую продолжительность обжига. Внутри «нулевого» модуля размещены тепловые камеры, по которым вытяжным вентилятором (на рис. 1 не показан) проникает горячий воздух, обеспечивая его нагрев для завершения дегидратации вермикулита без потерь эксергии, накопленной во вспученных зернах [4] (см. рис. 1, стрелки «К вытяжке»).

В исходной трехмодульной печи-прототипе (см. рис. 1, а) использовалась нижняя нагревательная система из соединенных в электрическую цепь П-образных ленточных излучателей, закрепленных только на головках 5 и образующих продольные камеры со стенками высотой 8–10 мм. Верхняя нагревательная система из проволоочных излучательных элементов показана на рис. 2 в горизонтальном положении. Между огнеупорным основанием 1 и термокрышкой 2, покрытой муллитокремнеземистым войлоком 3 и выполненной из керамовермикулитовой плиты [8], расположены закрепленные на головках 4 и серьгах 5 электрические излучатели лучистой энергии 6 с зазором а между термокрышкой и зазором б между огнеупорным основанием. Под нагревателями движется поток вермикулитовых частиц или зерен в зависимости от степени их вспучивания. Термокрышка окантована металлическим уголком 7 и удерживается креплениями 8, а для устранения кондуктивного стока тепла через серьги 5 сверху покрыта войлоком 3.

ВЕРМИКУЛИТ В ЗОНАХ ПЕРЕСЫПАНИЯ МОДУЛЕЙ С РАЗНЫМИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ

Как отмечалось выше, в зонах пересыпания вермикулита с модуля на модуль его зерна из-за нулевой скорости вдоль оси модуля создавали как минимум двухрядную слоистую структуру. На рис. 3 показана регулярная структура (модель) двухслойного массива из одинаковых зерен во фрагментах поперечных сечений модулей с нижней нагревательной системой (рис. 3, а). Зерна ограничены стенками из полосового никрома толщиной s , образующими рабочие камеры шириной r с верхней нагревательной системой (рис. 3, б), в которой зерна не подвергаются стеснению стенками.

В модулях с нижней нагревательной системой при избыточной подаче сырья и двухслойном расположении зерен тепловое излучение в зонах пересыпания наталкивалось на преграду из термоизолирующего вермикулита, что приводило к быстрому локальному перегреву никрома, его перегоранию и отказу печи. Поэтому желание увеличить подачу и производительность печи ограничивалось вышеупомянутыми значениями Π_v .

В модулях с верхней нагревательной системой из проволочных нагревателей (см. рис. 3, б) при избыточной подаче и двухслойном расположении зерен тепловое излучение не замыкается внутри камер, так как их здесь попросту нет, а

пересыпания с последующим переходом в однослойное расположение на нижнем участке (рис. 4).

Пусть изначально зона пересыпания с двухслойным расположением зерен имеет длину l в верхней части модуля (см. рис. 4). Внутри выделенного прямоугольника зерна занимают высоту $2D$. Нижние зерна под точкой b начинают ускоренно раскатываться, а верхние под точкой a пока не движутся. На участке модуля $2l$ (см. рис. 4) все зерна уже располагаются в один слой без зазоров между собой, при этом зерна под точкой b уже имеют некоторую скорость, а зерна под точкой a только начинают движение. Происходит переход от двухслойной регулярной структуры зерен к однослойной. Ниже точки b зерна начинают ускоренно раскатываться, все более отдаляясь друг от друга, но при удвоенной их концентрации на огнеупорном основании 1 (см. рис. 2).

В исходной опытно-промышленной печи-прототипе [7], конструктивные параметры модулей обжига которой примем в качестве базовых, общая длина огнеупорной поверхности l_0 составляла 0,95 м и равнялась ее ширине $B = 0,95$ м. При этом длина l_0 «покрытой» ленточными электроизлучателями части огнеупорной поверхности модуля равнялась 0,9 м, а зона пересыпания, в которую поступает вермикулит, ссыпаясь с вышерасположенного модуля, имела длину $l = 0,05$ м.

В дальнейших расчетах будем придерживаться этих же размеров, чтобы при сравнении ва-

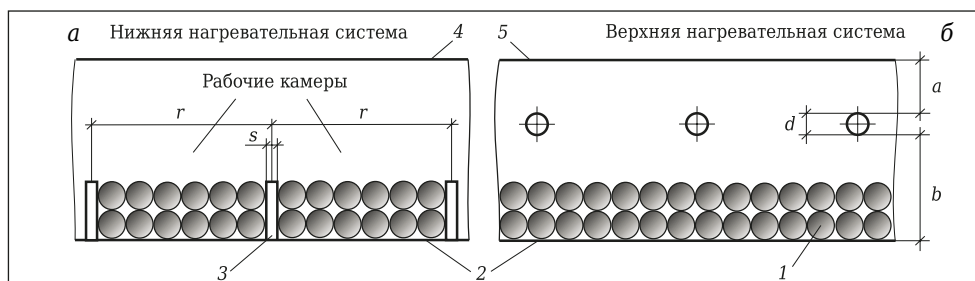


Рис. 3. Фрагменты сечения модулей обжига с нагревательными системами из поверхностных ленточных (а) и подвесных проволочных нагревателей (б)

падает на двухслойный массив сверху. Верхние зерна (или плоские частицы концентрата в зоне их ссыпания на верхний модуль из дозатора) начинают вспучиваться, хотя и закрывают собой частично от излучения нижележащие частицы. Но условий для локального перегрева излучателей в данном случае нет, и поэтому могут быть увеличены подача сырья и, следовательно, производительность печи.

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА В ЗОНАХ ПЕРЕСЫПАНИЯ И НА СОСЕДНИХ УЧАСТКАХ

Рассмотрим движение зерен по модулю при начальном двухслойном их расположении в зоне пе-

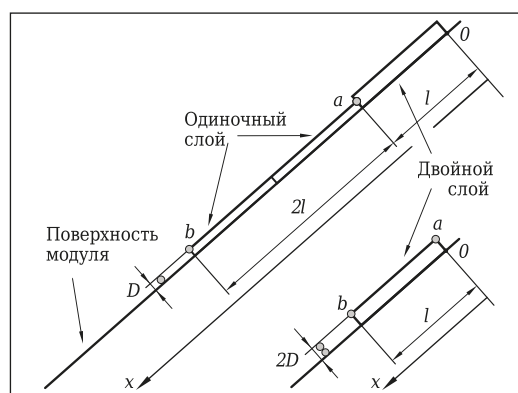


Рис. 4. Иллюстрация перехода от двухслойной структуры зерен к однослойной

риантов получить более точный результат. Для этого конструкция модуля с верхней нагревательной системой должна иметь некоторые контрольные размеры, как показано на рис. 2. Если длина зоны l (см. рис. 4, б) составляет, как в прототипе, 0,05 м и зерна в ней располагаются в два слоя, то за время t на участке модуля $2l$ длиной 0,1 м (см. рис. 4, а и рис. 2) зерна в тепловом поле электронагревателей 6 перестроятся в один слой (см. рис. 2). Следовательно, за счет участка $2l$ общая длина огнеупорной поверхности l_0 теперь увеличится до 1,05 м, а длина l_0 излучающей части нагревательных элементов будет равна 0,9 м, как в прототипе. Таким образом, изменится только длина огнеупорной поверхности l_0 , а длина покрытия вермикулитового потока тепловым излучением l_0 остается прежней. Начиная двигаться от точки a (см. рис. 4, а), каждое зерно пройдет путь, равный $l_0 - l$, т. е. 1,0 м.

Результаты исследования динамики потока вермикулита приведены в публикации [7], поэтому воспользуемся готовыми решениями и определим время t_k движения вспученных (кающихся) зерен по модулям:

$$t_k = \sqrt{2(l_0 - l) / g \sin \alpha} - \frac{\mu}{R} g \cos \alpha, \quad (1)$$

где α — угол наклона модуля, град; g — ускорение свободного падения, м/с²; μ/R — относительный коэффициент сопротивления качению вермикулитовых зерен (размерность μ — метр), определенный экспериментально [7] и равный примерно 0,32; R — усредненный радиус качения, м.

Показано [9], что время движения (скольжения) плоских невспученных частиц в верхнем модуле составляет примерно 10 % полной про-

должительности движения вермикулита в трехмодульной печи-прототипе (2,74 с — постоянная времени печи [7]). Этим можно пренебречь и вести расчет времени по формуле (1), которая дает суммарное время прохождения потока по двум модулям $t_{\Sigma} = 1,3$ с. Но такой расчет делается для шарообразных тел. Анизотропия формы вермикулитовых зерен, не имеющих шаровой симметрии, увеличивает время движения, как показали эксперименты с опытно-промышленной печью, примерно на 40 % [7]). Следовательно, в формулу (1) следует ввести поправочный коэффициент 1,4, и тогда время прохождения потока в двухмодульной печи t_{Σ} (см. рис. 1, б) будет равно 1,82 с.

Обратимся к результатам определения насыпной плотности ρ вспученного вермикулита из ковдорского концентрата КВК-4 в опытно-промышленной трехмодульной печи исходной концепции (см. таблицу) [7]. На первом (верхнем) модуле ρ уменьшается от 540 до 126 кг/м³, и на это затрачивается 33 % тепловой мощности печи, на втором модуле изменяется от 126 до 94 кг/м³, но и на это уже незначительное «довспучивание» также затрачивается треть мощности. Третий модуль, потребляя те же 33 % мощности, изменяет ρ всего на 8 кг/м³. Очевидно, что это далеко не рациональная конструкция печи.

По данным таблицы построен график дегидратации и потери ρ вермикулита Ковдорского месторождения в процессе его обжига в печи (рис. 5). В опытно-промышленной трехмодульной печи-прототипе время прохождения вспучивающихся зерен вермикулита составляло примерно 2,74 с и достигалась плотность вспученного материала около 86 кг/м³ [7]. Модифицированная двухмодульная печь за время 1,82 с способна пропустить в 2 раза больше вермикулита (из-за двухслойного заполнения зон пересыпания) и получить на выходе плотность всего на 9 % больше — 94 кг/м³ (см. рис. 5), потребляя при этом электроэнергию на треть меньше. Эти недостающие 8 кг/м³ восполнит «нулевой» модуль 7 (см. рис. 1, б), что было доказано экспериментально [5].

Однако возможность удвоения производительности и значительного снижения удельной энергоемкости процесса должна быть доказана. Окажется ли достаточно мощности нагревательных систем двух модулей, чтобы за 1,82 с обеспечить полноценное теплосвоение и вспучивание столь плотного вермикулитового потока?

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБЖИГА В МОДУЛЯХ С ВЕРХНЕЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

При исследовании процесса теплосвоения вермикулита в тепловом поле модулей обжига спусковых печей предполагалось, что к моменту выхода из печи массив вспученного вермикулита нагревается до температуры электрических излу-

Распределение насыпной плотности вермикулита в процессе его движения в печи

Модуль (сверху вниз)	Плотность материала, кг/м ³		Изменение плотности на модуле $\Delta\rho$, кг/м ³
	$\rho_{\text{вх}}$ на входе в модуль	$\rho_{\text{вых}}$ на выходе из модуля	
Первый	540	126	414
Второй	126	94	32
Третий	94	86	8

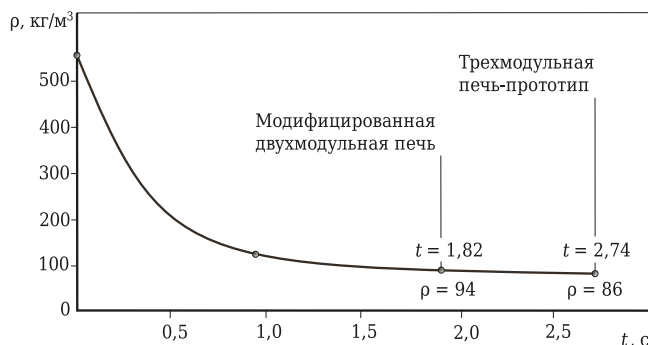


Рис. 5. График дегидратации и потери насыпной плотности вермикулита

чателей; расчеты давали значения усвоенной теплоты θ , для ковдорских концентратов в среднем 1210 кДж/кг [7, 10]. Последние эксперименты на физической полномасштабной модели электрической печи с подвижной подовой платформой показали, что при достижении минимальной плотности вермикулита 90–92 кг/м³ массив вспученного материала достигал температуры около 512 °С, а температура излучающих поверхностей нихрома составляла в разных точках от 718 до 776 °С при среднем значении 747 °С [11]. Столь заметное расхождение привело к необходимости перерасчета уравнения баланса удельных тепловых энергий:

– энергия дегидратации минерала остается прежней: $\theta_x = 196,9$ кДж/кг [7];

– энергия, аккумулированная сухим веществом вспученных зерен, стала меньше: $\theta_c = c_{\text{к.т.}} \cdot m \cdot 0,816 \Delta T = 860 \cdot 1,23 \cdot 10,806(512 - 100) = 349,8$ кДж/кг, где c — средняя теплоемкость вермикулитовых концентратов 860 Дж/(кг·°С) [12]; k_t (1,23) — коэффициент, учитывающий возрастание удельной теплоемкости минерала при повышении температуры [13]; m — масса концентрата (1 кг); 0,806 — доля твердой фазы [7]; (512–100 °С) — перепад температур ΔT , где 100 °С — температура предварительно подогретого концентрата перед подачей в печь;

– теплота фазового перехода химически связанной и межслоевой воды при 100 °С остается прежней: $\theta_b = 258,8$ кДж/кг;

– энергия перегрева водяного пара уменьшится: $\theta_n = c_n \cdot m \cdot 0,115 \Delta T = 1593,4 \cdot 10,115(512 - 100) = 75,5$ кДж/кг, где c_n — средняя удельная теплоемкость водяного пара в диапазоне от 100 до 500 °С, составляющая около 1593,4 Дж/(кг·°С) [14];

– теплота нагрева адсорбированного углекислого газа уменьшится и будет равна:

$$\theta_{a.g} = c_{\text{CO}_2} \cdot m \cdot 0,115 \Delta T = 1102 \cdot 10,115(512 - 100) = 52,2 \text{ кДж/кг.}$$

Тогда энергия теплоусвоения 1 кг ковдорского концентрата будет равна:

$$\theta = \theta_x + \theta_c + \theta_b + \theta_n + \theta_{a.g} = 933,2 \text{ кДж/кг.}$$

Полученное значение соответствует чистому вермикулитовому концентрату, но в нем присутствует до 10 мас. % инертного материала, который тоже поглощает теплоту: $\theta_n = 0,1 c_n m \Delta T = 0,1 \cdot 942,5(512 - 100) = 38,8$ кДж/кг, где 0,1 — массовая доля инертного материала в 1 кг концентрата; c_n — теплоемкость инертного материала (для песка при 20–600 °С c_n в среднем равна 942,5 Дж/(кг·°С) [7]); m — масса исходного концентрата (1 кг); ΔT — изменение температуры при нагреве, °С.

Без учета инертного материала величина θ для чистого вермикулита снизится:

$$\theta = 0,9\theta = 0,9 \cdot 933,2 = 840,0 \text{ кДж/кг.} \quad (2)$$

Поглощаемая вермикулитом мощность теплового излучения Q_v , Вт, с учетом поглощающей спо-

собности его зерен ($\alpha_b = 0,768$ [9]) и полная удельная энергия теплоусвоения θ , Вт, при температуре нагрева зерен 512 °С связаны соотношением

$$\theta P_G = Q_v, \quad (3)$$

где P_G — массовая производительность печи, кг/с.

Мощность Q_v выражается формулой [16]:

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

где σ — постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) [14]; T_n — температура поверхности излучателей нагревательной системы модулей, К; f_n — суммарная площадь поверхности всех излучателей печи, м²; ε_n — степень черноты нихрома (0,96 [17]); α_b — поглощающая способность вермикулитового массива; φ_{12} — средний угловой коэффициент для результирующих потоков мощности соседних излучателей (0,032 [16]); φ_1 и φ_2 — средние угловые коэффициенты для результирующих потоков мощности, идущих от соседних излучателей слева и справа на вермикулитовое единичное зерно [16].

Выразим производительность отношением

$$P_G = m/t, \quad (5)$$

где m — масса вермикулитового концентрата и вспучивающегося вермикулита, одновременно находящегося на огнеупорных поверхностях модулей двухмодульной печи (см. рис. 1, б); t — время движения вермикулита в печи, равное времени обжига.

Приравниваем выражения (3) и (4) и с учетом m/t получим

$$\theta \cdot \frac{m}{t} = 2 \cdot \sigma T_n^4 f_n \varepsilon_n (1 + \alpha_b \varphi_{12}) \cdot \frac{1}{3} (2\varphi_1 + \varphi_2). \quad (6)$$

В предыдущей работе автора [18] формула для определения массы вермикулита, одновременно находящегося на огнеупорной поверхности одного модуля, была записана в виде

$$m = \frac{\pi B D (l + \zeta)}{12(1 - k_n) k_b}, \quad (7)$$

но в нашем случае (см. рис. 1, б) для печи с двумя последовательно соединенными модулями обжига формула (7) примет вид

$$m = \frac{\pi B D \cdot 2l_0}{12(1 - k_n) k_b}, \quad (8)$$

где l_0 — длина рабочей поверхности модуля, включая зону пересыпания, м; k_n — коэффициент пористости вспученного материала (0,35); k_b — коэффициент вспучивания, $k_b \sim 0,0085$ м³/кг [19].

Чтобы рассчитать объемную производительность печи P_v , м³/с (см. рис. 1, б), формулу (5) с учетом формулы (8) приведем к виду

$$P_v = \frac{\pi B D l_0}{6(1 - k_n) t}. \quad (9)$$

Задавая размеры модуля новой печи: $B = 0,95$ м и $l = 0,05$ м, получим производительность на ковдорском концентрате КВК-2 ($D = 0,002$ м), равную $0,0009$ м³/с, или $3,24$ м³/ч. Это примерно в 2 раза больше, чем у печи-прототипа ($1,5 - 1,75$ м³/ч [7]).

Далее, решая совместно выражение (8) и уравнение (5), после соответствующих преобразований получим формулу для определения $T_{и}$, при которой будет обеспечено полноценное вспучивание вермикулита при данной производительности:

$$T_{и} = \sqrt[4]{\frac{\theta \cdot \pi B D l_0 \cdot 10^8}{4 \cdot \sigma (1 - \kappa_{и}) \cdot f_{и} \varepsilon_{и} (1 + \alpha_{в \varphi_{12}}) (2\varphi_1 + \varphi_2) \cdot t}} \quad (10)$$

Температуру рассчитаем при следующих исходных данных: полная энергия теплоусвоения вермикулита $\theta = 933200$ Дж/кг, $B = 0,95$ м, $a = 0,005$ и $b = 0,015$ м (см. рис. 2), $r = 0,035$ м, $D = 0,004$ м, $l_0 = 1,05$ м, количество излучателей в одном модуле 10 шт. диаметром $0,005$ м, их длина $l_3 = 0,95$ м, $\varphi_{12} = 0,032$, $\varphi_1 = 0,058$ и $\varphi_2 = 0,033$. Угловые коэффициенты рассчитаем по алгоритму, описанному в статье [16]. За время обжига $t = 1,82$ с вермикулит должен вспучиться при температуре $884,6$ К, или $611,6$ °С.

Воспользуемся формулой связи температуры вермикулита на выходе из печи и температуры излучателей, приведенной в статье [16]:

$$T_{вер} = T_{и} \sqrt[4]{\frac{f_{и} \alpha_{в} \varepsilon_{и} (1 + \rho_{и} \varphi_{12})}{f_{в}}} \frac{2}{3} (2\varphi_1 + \varphi_2). \quad (11)$$

По выражению (11) построен график для установления зависимости $T_{вер}$ от $T_{и}$, который в нашем случае имеет вид, показанный на рис. 6. Экспериментально доказано [20], что при температуре вермикулита $510 - 512$ °С независимо от размеров его зерен, если процесс вспучивания имел характер теплового удара $1,5 - 3$ с, вермикулит полноценно вспучивается и достигает минимально возможной плотности. За время обжига $1,82$ с в двухмодульной спусковой печи новой конструкции ковдорский вермикулит будет полностью вспучен, даже не доходя до «нулевого» модуля.

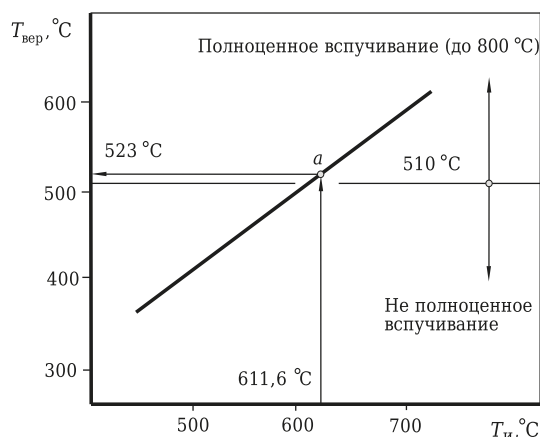


Рис. 6. Зависимость температуры ковдорского вермикулита от температуры излучательных элементов печи

А это означает, что температура излучателей, а следовательно, и потребляемая электроэнергия могут быть немного снижены, чтобы довспучивание вермикулита перенести в дополнительный модуль 7 (см. рис. 1, б). Для этого при настройке печи на оптимальный режим работы должен использоваться тиристорный регулятор мощности.

Определим удельную энергоёмкость обжига ковдорского вермикулита, исходя из соотношения тепловой и электрической мощностей N , Вт:

$$N = \sigma T_{и}^4 f_{и} = 3kIU, \quad (12)$$

где k — поправочный коэффициент, учитывающий потери электрической мощности трехфазной сети ($3IU$) при ее преобразовании в тепловую.

Удельная энергоёмкость процесса обжига e_y , Дж/м³, с учетом формулы (9) будет равна

$$e_y = \frac{\sigma T_{и}^4 f_{и}}{\Pi_v} k. \quad (13)$$

При коэффициенте потерь k , равном $1,16$, расчет по формуле (13) дает $e_y = 50,4$ Дж/м³.

Исследовали возможности и перспективы применения электрических модульно-спусковых печей с последовательно-параллельным соединением модулей обжига и новой конструкцией верхней нагревательной системы, в результате чего была предложена четырехмодульная печь производительностью $2,56$ м³/ч с удельной энергоёмкостью обжига ковдорского концентрата $63,5$ мДж/м³ [20]. Это очень хорошие показатели, практически равные показателям электрических печей с подвижной подовой платформой [6]. Однако из-за двух верхних параллельно работающих модулей, в которых вермикулит движется однослойным потоком, ее производительность ниже, чем у новой двухмодульной ($2,56$ против $3,24$ м³/ч), а удельная энергоёмкость больше ($63,5$ против $50,4$ Дж/м³). Следует отметить, что у опытно-промышленной трехмодульной печи-прототипа удельная энергоёмкость не ниже 240 мДж/м³ [3, 22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный результат — снижение удельной энергоёмкости процесса обжига вермикулита в двухмодульной печи с «нулевым» (неэлектрифицированным) модулем до уровня $50,4$ Дж/м³ — новое радикальное техническое решение в развитии концепции электрических модульно-спусковых печей. При меньших габаритных размерах и меньшей сложности конструкции получена печь с удвоенной производительностью при сниженном на треть потреблении электроэнергии. Такие печи будут конкурировать с печами на основе подвижных подовых платформ [6]. В сравнении с ними двухмодульные спусковые печи имеют только один привод для работы барабанного дозатора, тогда как печи с подовыми платформами требуют дополнительного управляемого привода для соз-

дания колебательных движения подвижного пода и движения вермикулита за счет эффекта вибро-транспортирования.

Создание нагревательной системы печи из набора проволочных излучателей тепловой энергии с их верхним расположением и закреплением под

Библиографический список

1. **Нижегородов, А. И.** Некоторые аспекты технологии подготовки и обжига вермикулитовых концентратов в электрических печах / А. И. Нижегородов // Строительные материалы: technology. — 2007. — № 11. — С. 16, 17.

2. **Ахтямов, Р. Я.** Вермикулит — сырье для производства огнеупорных теплоизоляционных материалов / Р. Я. Ахтямов // Огнеупоры и техническая керамика. — 2009. — № 1/2. — С. 59–64.

3. **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.

4. **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.

5. **Nizhegorodov, A. I.** Study of an electric furnace physical model for firing vermiculite with a «ze-ro» 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.

6. **Nizhegorodov, A. I.** Electrical roasting system with vibrational batch supply / A. I. Nizhegorodov // Russian Engineering Research. — 2017. — Vol. 37, № 3. — P. 180–184.

7. **Нижегородов, А. И.** Технологии и оборудование для переработки вермикулита: оптимальное фракционирование, электрический обжиг, дообогащение / А. И. Нижегородов. — Иркутск : Изд. ИрГТУ, 2011. — 172 с.

8. Пат. 192841, Российская Федерация, МПК F 27 В 9/06. Электрическая печь для получения вспученного вермикулита / Нижегородов А. И. ; заявитель и патенто-обладатель ФГБОУ ВО ИРНИТУ. — № 2019121160 ; заявл. 08.07.2019 ; опубл. 02.10.2019, Бюл. № 28.

9. **Nizhegorodov, A. I.** Analytical model of absorption-reflection properties of vermiculite under thermal / A. I. Nizhegorodov, A. V. Zvezdin, T. B. Bryanskikh // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 1. — P. 19–24.

Нижегородов, А. И. Аналитическая модель поглощательно-отражательной способности вермикулита в условиях теплового излучения / А. И. Нижегородов, А. В. Звездин, Т. Б. Брянских // Новые огнеупоры. — 2017. — № 1. — С. 15–20.

10. **Нижегородов, А. И.** Опыт эксплуатации технологического оборудования и комплексов для переработ-

термокрышками модулей не только энергетически эффективнее прежней нагревательной системы из П-образных камер из ленточного нихрома [7], но и обеспечивает пропускную способность печи, удваивая подачу концентрата в печь и ее производительность.

ки вермикулитовых концентратов и конгломератов. Огнеупоры и техническая керамика / А. И. Нижегородов // Огнеупоры и техническая керамика. — 2014. — № 9. — С. 14–20.

11. **Нижегородов, А. И.** Испытания новой альтернативной электрической печи для обжига вермикулитовых концентратов / А. И. Нижегородов, Т. Б. Брянских, А. Н. Гаврилин [и др.] // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. — 2018. — Т. 329, № 4. — С. 142–153.

12. Методические рекомендации по применению классификации запасов к месторождениям слюды. — М. : Мин-во природных ресурсов РФ, 2005. — 41 с.

13. **Хвостенков, С. И.** О теплоте гидратации и магнитной восприимчивости вермикулита / С. И. Хвостенков, О. А. Залкинд // Горнометаллургический институт Кольского ф-ла АН СССР : сб. науч. трудов. — 1966. — С. 90–100.

14. **Яворский, Б. М.** Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. — М. : Наука, 1968. — 940 с.

15. **Гершенков, А. Ш.** Выделение вермикулитового концентрата из хвостов обогащения вермикулитовых руд и его использование в жаростойком бетоне / А. Ш. Гершенков, М. С. Хохуля, О. Н. Крашенинников, С. В. Бастрыгина // Горный журнал. — 2011. — № 11. — С. 57–59.

16. **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.

17. **Кутателадзе, С. С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справ. пособие / С. С. Кутателадзе. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 367 с.

18. **Нижегородов, А. И.** Перспективы применения и возможности электрических модульно-спусковых печей с измененной структурой и новой конструкцией нагревательной системы / А. И. Нижегородов // Новые огнеупоры. — 2020. — № 3. — С. 14–19.

19. **Нижегородов, А. И.** Энерготехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов / А. И. Нижегородов, А. В. Звездин. — Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2015. — 250 с.

20. **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.

21. **Nizhegorodov, A. I.** Theory and practical use of modular-pouring electric furnaces for firing vermiculite / A. I. Nizhegorodov // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 361–365.

Нижегородов, А. И. Теория и опыт применения электрических модульно-спусковых печей для обжига вермикулита / А. И. Нижегородов // Новые огнеупоры. — 2015. — № 8. — С. 34–38. ■

Получено 24.01.20
© А. И. Нижегородов, 2020 г.