

Д. т. н. А. И. Нижегородов (✉), А. В. Звездин

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

УДК 622.367.8:66.041.3-65

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА ВЕРМИКУЛИТА С «НУЛЕВЫМ» МОДУЛЕМ

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований, выполненных на опытной печи для проверки возможности завершения теплоусвоения зернами вермикулита и структурообразования в них за счет перехода эксергии вермикулита в энергию механической трансформации в так называемом «нулевом» модуле при сниженном энергопотреблении. Экспериментально установлены зависимости плотности вспучиваемого продукта на входе в «нулевой» модуль и на выходе из него от температуры на поверхности нагревателей в электрических модулях печи. Определено время прохождения зерен вермикулита через «нулевой» модуль, установлено значение коэффициента полноты теплоусвоения, корректирующее аналитическую модель процесса. Приведено аналитическое выражение, описывающее процесс теплоусвоения вермикулита при незавершенном теплоусвоении в электрических модулях с учетом корректирующего коэффициента полноты. Показано, что применение «нулевых» модулей может снижать потребление энергии и энергоемкость обжига на 10–20 % в зависимости от места установки «нулевого» модуля.

Ключевые слова: вспучиваемый продукт, электрическая печь, теплоусвоение, эксергия, модуль обжига, «нулевой» модуль, энергоемкость.

ВВЕДЕНИЕ

В статье [1] приведены результаты исследования аналитических моделей процессов теплоусвоения вермикулита и температуропроводности его зерен с учетом завершения структурообразования в дополнительном неэлектрифицированном «нулевом» модуле. На примере вермикулитового концентрата КВК-4 Ковдорского месторождения определены коэффициент полноты теплоусвоения и время выравнивания температуры, равное дополнительному времени нахождения вермикулита в «нулевом» модуле печи. Теоретически решена задача снижения удельной энергоемкости обжига за счет экономии электроэнергии при уменьшенной мощности печи при режиме обжига с пониженными температурами.

Новое техническое решение — использование неэлектрифицированного, или так называемого «нулевого», модуля, установленного последовательно в цепь стандартных электрических модулей [2], позволяет использовать тепловую эксергию, накопленную вермикулитом, и тепловое излучение мелких фракций вермикулита и инертного материала для завершения механической трансформации вермикулита (структурообразования) при отсутствии внешнего источника тепла.



А. И. Нижегородов

E-mail: nastromo_irkutsk@mail.ru

УСТРОЙСТВО ПЕЧИ С НЕЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫМ «НУЛЕВЫМ» МОДУЛЕМ

На рис. 1 показана электрическая печь с дополнительным модулем, снабженная системой отделения инертного материала после обжига, присутствующего в вермикулитовых концентратах. Печь содержит дозатор 1, спусковой лоток 2 и корпус 3, в котором под углом друг к другу расположены электрические модули 4 с рекуператорами тепловой энергии 5, соединенными с трубопроводами 6, изолированными термостойким материалом (он показан тонкими линиями). Дополнительный неэлектрифицированный модуль с коллекторами 7, тепловыми камерами 8 и пространством обжига 9 расположен под нижним электрическим модулем 4 и снабжен трубопроводом 10, соединенным с вытяжным вентилятором. На нижнем торце «нулевого» модуля установлена тепловая завеса 11, соединенная с напорным патрубком 12 вытяжного вентилятора. Печь оборудована бункером 13 для вспученного вермикулита и бункером 14 для инертного материала, а также вентилятором 15.

Барабанный дозатор подает концентрат в верхний модуль 4. Пересыпаясь с одного модуля на другой, концентрат подвергается воздействию теплового излучения, идущего от электрических нагревателей, при этом частицы вермикулита вспучиваются. Но не вся излучаемая энергия поглощается вермикулитом; часть энергии нагревает воздух, из-за чего возникает перепад температур и в модулях образуются потоки горячего воздуха, выходящие из верхних торцов. Другая часть энергии,

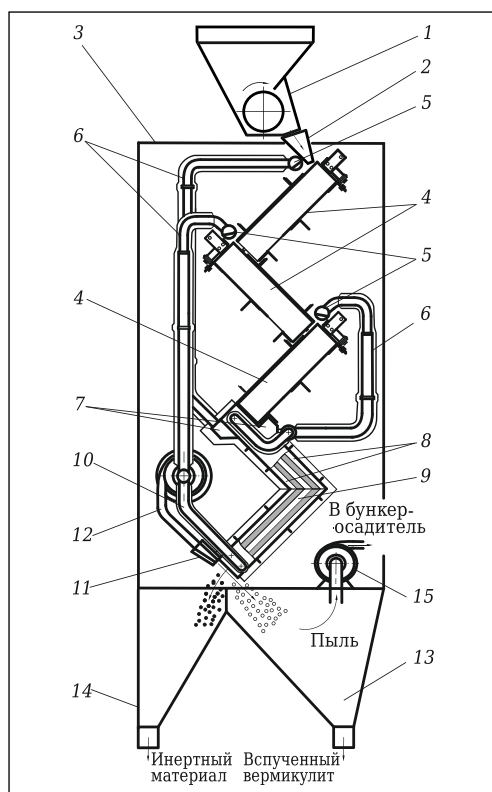


Рис. 1. Электрическая модульно-спусковая печь с «нулевым» модулем и системой отделения инертного материала

отражаясь от основания и термодышек модулей 4 и от самого вермикулита, выходит из модулей и нагревает рекуператоры. Горячий воздух с температурой 560–590 °С прокачивается по коллекторам «нулевого» модуля за счет разряжения в трубопроводе 10, создаваемого вытяжным вентилятором через тепловые камеры 8. В пространстве 9 вермикулит окончательно вспучивается. На нижнем торце «нулевого» модуля из щелевидного отверстия тепловой завесы выходит горячий воздух, направленный на поток обожженного и вспученного концентрата, создающий избыточное давление на выходе из пространства 9 и исключающий подсос холодного воздуха извне. Поток воздуха легкие частицы вермикулита отделяются от инертного материала. При этом вспученный вермикулит поступает в бункер 13, инертный материал — в бункер 14. С помощью вентилятора 15 обеспечивается сбор пыли и отвод ее в бункер-осадитель и фильтр (на рис. 1 не показаны).

В соответствии со схемой печи на рис. 1, за исключением системы воздушного отделения инертного материала, в 2015 г. была построена опытная печь с дополнительным неэлектрифицированным («нулевым») модулем.

Исследования на физической модели

На рис. 2 показана опытная электрическая модульно-спусковая печь; на рис. 3 — ее «нулевой» модуль до установки в печь и заделки тер-

моизоляционным материалом; на рис. 4 — печь со снятыми термодышками во включенном состоянии.

На этой печи проводились экспериментальные исследования, главной целью которых было определение возможности реализации завершеного теплоусвоения зернами вермикулита и их структурообразования за счет преобразования эксергии этих процессов в энергию механической трансформации в «нулевом» модуле печи при сниженном энергопотреблении.

В работе [1] были рассмотрены аналитические модели процессов теплоусвоения вермикулита и температуропроводности его зерен, по результатам исследований которых дан прогноз на 11 %-ное снижение энергоемкости обжига при снижении температуры обжига на 30 °С (от 750 до 720) при работе печи с «нулевым» модулем на концентрате КВК-4.

В настоящее время ОАО «Ковдорслюда» временно не поставляет вермикулитовые концентраты, поэтому опыты проводили на подобном по размерности сырье, но с большим количеством флогопита и других слабовспучивающихся гидрослюд, с содержанием песка и камней с размерами частиц от 1,5 до 4,5 мм при массовой доле около 12 %. Поставщиком небольшой партии сырья был Институт химии и технологии редкоземельных элементов и минерального сырья (ИХТРЕМС) Кольского научного центра РАН (г. Апатиты Мурманской области), который являлся заказчиком опытной печи.

Фракционный состав комбинированного сырья был указан поставщиком как фракция 2–4 мм при измеренной средней насыпной плотности 955,7 кг/м³ и влажности 7 %. Для ковдорского концентрата КВК-4, примерно близкого по фракционному составу, средняя насыпная плотность

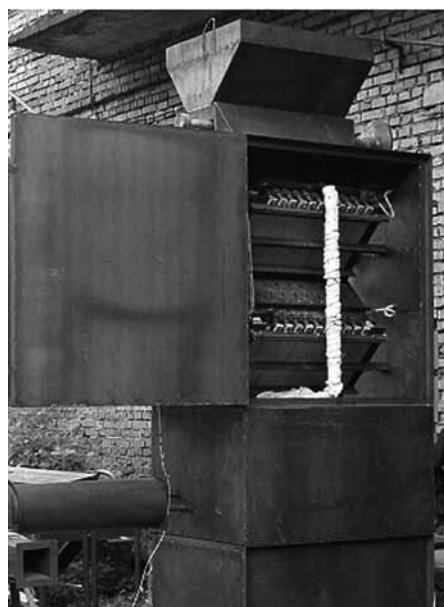


Рис. 2. Опытная печь

составляла 790–800 кг/м³ [3], а содержание каменистого гранулята (пироксеноливин и других сопутствующих минералов) было не более 6 %.

Так как свойства исходного сырья существенно отличались от свойств типовых ковдорских концентратов, в привычном для них температурном диапазоне 730–780 °С использовавшийся для обжига продукт недовспучивался, поэтому температурный диапазон был смещен в сторону увеличения до 800–1000 °С. Но даже при повышенных температурах предел наименьшей плотности составил 227 кг/м³, тогда как типовой концентрат КВК-4 вспучивался до плотности 80–98 кг/м³. Кроме того, отличительной чертой вспученной промежуточной формы вермикулит-флогопита является металлический, сталистый цвет. Именно такие оттенки доминировали в большинстве вспученных зерен обожженного продукта.

Методика экспериментов включала:

- начальную установку температуры по прибору управления тепловым режимом печи;
- прогрев печи в течение 1 ч после первой установки с установленными термокрышками и закрытыми створками;
- измерение температуры на поверхности нихрома с помощью штатной термопары щупа пирометра DT-8835 с точностью в диапазоне от -50 до 1000 °С ± 1,5 % показания. Измерение температур на поверхности нихромовых нагревателей проводили по 10 точкам в каждом из трех электрических модулей в центральных зонах;
- расчет среднего по 10 измерениям значения температуры на каждом модуле;
- расчет среднего значения температуры по трем модулям;
- измерение температуры воздуха в зоне его всасывания верхним рекуператором с помощью ртутного градусника с верхним пределом измерений 500 °С;
- подачу сырья барабанным дозатором в течение 10–12 мин;
- взятие не менее трех проб обжигаемого сырья и определение взвешиванием средней насыпной плотности на входе в «нулевой» модуль и на выходе из него;
- определение средней разности насыпной плотности;
- остановку дозатора и новую установку на следующее повышенное значение;
- выдержку во времени для выхода модулей печи на установившийся тепловой режим в течение 20–25 мин;
- повтор операций, начиная с третьей позиции.

Для ограничения зоны движения сырья по модулям печи ширина выходного прохода бункера была сужена металлическими пластинами до 0,42 м, чтобы обеспечить движение по наиболее горячей зоне, в которой проводились измерения температуры.

В табл. 1 приведены результаты экспериментов. По результатам опытов построены за-



Рис. 3. «Нулевой» модуль

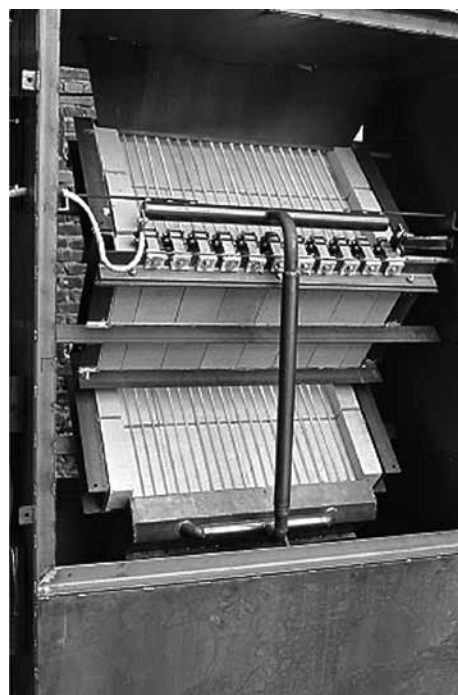


Рис. 4. Печь в режиме нагрева (термокрышки модулей сняты)

висимости насыпной плотности вспучиваемого продукта до входа в «нулевой» модуль (рис. 5, график 1) и после выхода из него (рис. 5, график 2) от средней температуры нагревательных элементов, полученной по измерениям в 10 точках в каждом из трех электрических модулей в центральных зонах.

По мере повышения средней температуры нагревателей разность насыпных плотностей $\Delta\rho$ уменьшается (см. рис. 5). Так, при 815 °С разность плотностей $\Delta\rho$ в точках *a* и *b* составляет 53 кг/м³, при 875 °С $\Delta\rho$ между точками *c* и *d* равна 34 кг/м³, а на предельной минимальной плотности по кривой 2 (на выходе из «нулевого» модуля) в точках *f* и *e* разность плотностей $\Delta\rho$ равна 9 кг/м³.

Зависимости $\rho_{\text{вх}}$ и $\rho_{\text{вых}}$ от температуры (графики 1 и 2) асимптотически примыкают к условной линии предельной минимальной плотности 227 кг/м³ и определяют ее расположение. Это

Таблица 1. Результаты экспериментов

Опыт	t_{cp} , °C	$\rho_{вх}$, кг/м ³	$\rho_{вх,ср}$, кг/м ³	$\rho_{вых}$, кг/м ³	$\rho_{вых,ср}$, кг/м ³	$\Delta\rho$, кг/м ³
1	801	346; 326; 338	337	298; 301; 282	294	66
2	826	393; 255; 281	323	256; 310; 250	272	44
3	858	347; 255; 301	301	302; 263; 240	294	38
4	890	277; 304; 258	279,5	235; 284; 248; 214	245	29
5	921	284; 244; 232	252	217; 286; 254; 196	238	21
6	953	257; 246; 232	345	261; 212; 216; 227	229	11
7	992	241; 218	229,5	205; 241	223	6,5

* t_{cp} — средняя температура нагревателей; $\rho_{вх}$ — насыпная плотность вспучиваемого продукта на входе в «нулевой» модуль; $\rho_{вых}$ — на выходе из «нулевого» модуля; $\rho_{вх,ср}$ и $\rho_{вых,ср}$ — средние величины; $\Delta\rho$ — изменение насыпной плотности продукта после прохождения через «нулевой» модуль.

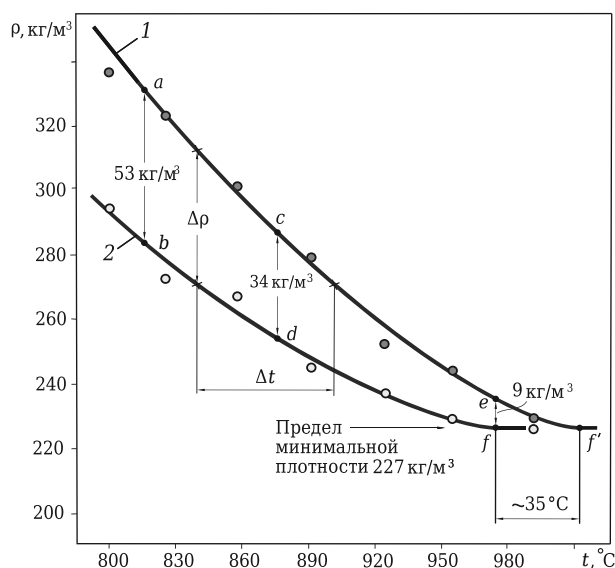


Рис. 5. Изменение плотности ρ до входа в «нулевой» модуль (1) и после выхода из него (2) в зависимости от температуры t

тот случай, когда конкретное положение точек f и f' установить невозможно: они лишь угадываются по областям сближения графиков 1 и 2 с линией минимальной плотности. Поэтому значения $\Delta\rho$ в точках f и e (~ 9 кг/м³) и разности температур в точках f и f' (~ 35 °C) можно рассматривать лишь как ориентировочные. Тем не менее на них можно опираться, интерпретируя результаты экспериментов и аналитических исследований, выполненных в работе [1].

В работе [4] приведены результаты экспериментов по исследованию процессов дегидратации и вспучивания ковдорских концентратов, выполненных ранее на опытно-промышленных модульно-спусковых печах без «нулевого» модуля. Выборочные данные по обжигу концентрата КВК-4 в трехмодульной печи приведены в табл. 2, из которой видно, что на третьем (нижнем) модуле изменение плотности вспучиваемого вермикулита (разность плотностей на входе и выходе модуля) составило 8 кг/м³. В опытах, проведенных в настоящей работе, изменение плотности вспучиваемого продукта при его прохождении через «нулевой» модуль составляет 9 кг/м³.

Таблица 2. Опытно-промышленная печь (обжиг концентрата КВК-4)

Модуль (сверху вниз)	Кажущаяся плотность, кг/м ³		Изменение кажущейся плотности на модуле $\Delta\rho_v$, кг/м ³
	на входе в модуль $\rho_{вх}$	на выходе из модуля $\rho_{вых}$	
1	540	126	414
2	126	94	32
3	94	86 (на выходе из печи)	8

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эффект «нулевого» модуля очевиден уже из приведенного сравнения, и его можно интерпретировать так: он способен заменить нижний электрический модуль трехмодульной печи без ущерба для качества вспучивания и без снижения температуры накала электронагревателей в оставшихся модулях. Был бы способен, если бы данный результат был получен на концентрате КВК-4.

Для трехмодульной печи плотности на входе и выходе нижнего модуля равны соответственно 94 и 86 кг/м³ при $\Delta\rho = 8$ кг/м³ (см. табл. 2). Отношение $\Delta\rho$ к среднему значению плотности на входе и выходе для КВК-4 равно: $\rho_{от} = 8 / 0,5 \cdot (94 + 86) = 0,089$.

Для вспучиваемого в наших экспериментах продукта это отношение иное (см. рис. 5): $\rho'_{от} = 9 / 0,5 \cdot (236 + 227) = 0,039$, так как его абсолютная плотность намного больше.

Если при $\rho_{от} = 0,089$ снижение потребляемой мощности составляет треть от общей мощности (30,3 %), то при $\rho'_{от} = 0,039$ это снижение, исходя из соответствующей пропорции, составит $0,039 \cdot 33,3\% / 0,089 = 14,59\%$. Тогда, при неизменной производительности удельная энергоёмкость обжига должна уменьшиться от 223,7 мДж/м³ для трехмодульной печи [4] до $\sim 191,1$ мДж/м³.

Есть и другой способ определить снижение энергоёмкости при применении «нулевого» модуля. Обратимся к графиками 1 и 2 рис. 5. Положение точек f и f' на условной линии предельно минимальной плотности показывает, что одинаковая конечная плотность вспучиваемого продукта достигается в печи с «нулевым» модулем при средней температуре нагревателей на 35 °C меньше. Используя зависимость между потре-

бляемой мощностью печи $N_{\text{п}}$ и абсолютной температурой T , К, на поверхности нагревателей [1]

$$N_{\text{п}} = \sigma T^4 f, \quad (1)$$

получим соотношение

$$\frac{N_0}{N} = \frac{T_0^4}{T^4} = \frac{975 + 273}{1010 + 273} = 0,895, \quad (2)$$

где σ — постоянная Стефана – Больцмана; f — суммарная площадь излучающих поверхностей нагревателей; N_0 — потребляемая мощность печи с «нулевым» модулем, Вт; N — то же, но без «нулевого» модуля; T_0 и T — соответствующие температуры, К (в точке $f \sim 975$ °С, в точке $f' \sim 1010$ °С).

Здесь мы имеем снижение потребляемой мощности и, следовательно, удельной энергоёмкости обжига на 10,5 %.

Такое расхождение экспериментальных результатов (14,59 и 10,5 %) при двух разных подходах, несмотря на некоторую неопределенность (вышеуказанную и обусловленную наличием асимптотических участков на графиках 1 и 2 рис. 5), позволяет утвердиться в правильности полученных результатов. Если взять прогнозные значения, полученное по аналитической модели, 11,25 % [1], то оно укладывается в интервал между эмпирическими данными 10,5 и 14,59 % (среднее значение 12,5 %), полученными на физической модели печи.

Таким образом, эксперименты убедительно показывают, что эксергия, запасенная в крупных зернах вермикулита к моменту их перехода из электрического модуля в «нулевой», эффективно работает, трансформируясь в механическую энергию их структурообразования. Обе аналитические модели процессов теплоусвоения и температуропроводности вермикулита при обжиге в электрических печах с «нулевым» модулем без внешнего источника тепла, подтверждаются результатами проведенных исследований.

Анализ модели температуропроводности в ра-

боте [1] показал, что при коэффициенте полноты теплоусвоения $k_{\text{т}} = 0,876$ время дополнительного нахождения вермикулита в «нулевом» модуле должно составлять не менее 1,03 с. Эксперименты по определению времени движения вспучиваемого продукта в опытной печи без дополнительного модуля и с ним проводили методом «просыпки» порций вспученного вермикулита.

Пробу материала объемом 0,1 дм³ помещали в полный короткий цилиндр диаметром 62 и высотой 0,35 мм, устанавливаемый в верхней части первого (верхнего) модуля. После подъема цилиндра проба начинала движение, пересыпаясь по трем электрическим модулям, а затем по «нулевому» модулю. Фиксировали время начала и окончания выхода материала из нижнего электрического модуля печи и время начала и окончания выхода материала из «нулевого» модуля. В каждом опыте выполнялось 6 «просыпок». Замеры времени проводили на холодной печи с помощью электронного секундомера. Результаты измерений приведены в табл. 3.

Так называемое дополнительное время $\tau_{\text{доп}}$, или среднее время прохождения вермикулита по «нулевому» модулю, определяется разностью $\tau_{\text{доп}} = 3,12 - 1,61 = 1,51$ с. Это на 46,6 % больше, чем дополнительное время, рассчитанное по аналитической модели.

По-видимому, увеличение дополнительного времени и приводит к тому, что экспериментальный результат превышает прогноз: 12,5 % > 11,25 %. Следовательно, можно ввести корректировку и снизить значение коэффициента полноты $k_{\text{т}}$ для модели теплоусвоения, приняв его равным 0,85, что соответствует дополнительному времени 1,51 с [1].

Выше была отмечена тенденция к уменьшению разности насыпных плотностей $\rho_{\text{вх}}$ и $\rho_{\text{вых}}$ по мере возрастания средней по модулям температуры на поверхностях электрических нагревателей. Рассмотрим отношения приращений плотности

Таблица 3. К определению времени прохождения вермикулита в печи

Опыт	Время, с		Среднее время прохождения через печь, с	Среднее время по результатам 6 опытов, с
	до выхода первой частицы	выхода последней частицы		
Результаты «просыпки» вермикулита в трехмодульной печи без дополнительного модуля				
1	1,86	3,33	1,665	1,61
2	1,76	3,23	1,615	
3	1,62	3,00	1,50	
4	1,36	3,39	1,695	
5	1,61	3,00	1,50	
6	1,63	3,28	1,69	
Результаты «просыпки» вермикулита в трехмодульной печи с дополнительным модулем				
1	2,43	3,82	3,125	3,12
2	2,59	3,64	3,12	
3	2,35	3,64	3,00	
4	2,35	3,81	3,08	
5	2,58	3,74	3,16	
6	2,52	4,09	3,31	

Др к приращению соответствующей температуры Δt (см. рис. 5). Достаточно трех значений, чтобы количественно проследить тенденцию.

Значениям Др, равным 53, 34 и 9 кг/м³, соответствуют отношения $\Delta\rho/\Delta t$:

53 / 65 = 0,815; 34 / 55 = 0,618; 9 / 35 = 0,257 кг/(м³·К).

Отношения потребляемой мощности, рассчитанной с учетом формул (1) и (2), позволяют определить соответствующий процент ее снижения:

– при $\Delta\rho = 53$ кг/м³ $\frac{T_0^4}{T^4} = \frac{816 + 273}{881 + 273} = 0,793$; энергопотребление снизится на 20,7 %;

– при $\Delta\rho = 34$ кг/м³ $\frac{T_0^4}{T^4} = \frac{876 + 273}{931 + 273} = 0,829$; энергопотребление снизится на 17,1 %;

– при $\Delta\rho = 9$ кг/м³ $\frac{T_0^4}{T^4} = \frac{975 + 273}{1010 + 273} = 0,895$; энергопотребление снизится на 10,5 %.

По мере удаления от предельной минимальной плотности в область больших значений конечной плотности (в зону неполного вспучивания продукта), эффективность «нулевого» модуля возрастает. Это видно из отношений приращений (производная $dp/dT \rightarrow \max$) и снижения потребляемой мощности: от 10,5 к 20,7 %.

Конечно, уменьшать потребляемую мощность и удельную энергоемкость обжига за счет ухудшения качества вспученного вермикулита нецелесообразно. Но учитывая эту очевидно положительную тенденцию «нулевой» модуль можно устанавливать не в конце последовательного сопряжения всех модулей печи, а предпоследним, чтобы увеличить его эффективность. При этом последним будет типовой электрический модуль.

Возможны и другие комбинации. Например, два верхних модуля электрические, затем — «нулевой» модуль, четвертый — электрический, а последний — второй «нулевой» модуль.

Подобные комбинации, примененные в печах с последовательно-параллельным сопряжением модулей (ППС-печи) [5], способны значительно повысить энергоэффективность обжига верми-

кулитовых концентратов и конгломератов, но эта тема отдельного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют уточнить новую модель теплоусвоения с учетом коэффициента полноты k_t , равного 0,85:

$$Q_{\Sigma} = k_b k_m (Q_x + Q_b + Q_n + Q_r + Q_c) + 0,85 \cdot k_b k_k (Q_x + Q_b + Q_n + Q_r + Q_c) + (1 - k_b) \cdot (Q_n + Q_{\phi}),$$

где Q_{Σ} — суммарная энергия, поглощаемая вермикулитом и сопутствующим инертным материалом при незавершенном теплоусвоении в печах с неэлектрифицированным «нулевым» модулем; k_b — массовая доля вермикулита в исходном концентрате; k_m и k_k — массовые доли вермикулита мелкой и крупной фракций в исходном концентрате; Q_x — энергия дегидратации химически связанной воды; Q_b — энергия фазового перехода адсорбированной и гидратной воды; Q_n и Q_r — энергия перегрева водяных паров и адсорбированных газов; Q_c — эксергия, накопленная в крупных зернах; Q_n — теплота нагрева инертного материала; Q_{ϕ} — теплота испарения физической воды, адсорбированной им [1].

При этом дополнительное время $t_{\text{доп}}$ нахождения вермикулита в «нулевом» модуле должно составлять от полного времени движения в печи не менее $1,51 / 3,12 = 0,48$, или 48 %.

Энергетический потенциал инертного материала и мелких фракций вермикулита, вносимый в «нулевой» модуль, не изменяется [1]. Однако можно усилить лучистый перенос тепла на зерна относительно крупных фракций за счет сужения «русла» так, чтобы по мере движения потока вспучиваемого вермикулита расстояние между зернами оставалось предельно малым на всем протяжении движения в «нулевом» модуле. Одним из вариантов технического решения является модуль с переменным сечением [6]. Но этот вопрос требует отдельного исследования.

Библиографический список

1. **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.
2. **Пат. 154263, Российская Федерация, МПК F 27 В 9/06.** Электрическая печь для обжига вермикулитовых концентратов / Нижегородов А. И., Звездин А. В.; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный технический университет (ФГБОУ ВО ИРНИТУ), г. Иркутск. — № 2015112982/02; заявл. 08.04.2015; опубл. 20.08.2015, Бюл. № 23.
3. **Нижегородов, А. И.** Технологии и оборудование для переработки вермикулита: оптимальное фракционирование, электрический обжиг, дообогащение / А. И. Нижегородов. — Иркутск: изд-во ИрГТУ, 2011. — 172 с.

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

5. **Пат. 85993, Российская Федерация, МПК F 27 В 15/00.** Печь для обжига вермикулита / Нижегородов А. И.; заявитель и патентообладатель А. И. Нижегородов, г. Иркутск. — № 2009114125/22; заявл. 14.04.09; опубл. 20.08.09, Бюл. № 23.

6. **Пат. 155942, Российская Федерация, МПК F 27 В 9/06.** Электрическая печь для обжига вермикулитовых концентратов / Нижегородов А. И.; заявитель и патентообладатель А. И. Нижегородов, г. Иркутск. — № 2015108580/02; заявл. 11.03.15; опубл. 20.10.15, Бюл. № 29. ■

Получено 16.03.16

© А. И. Нижегородов, А. В. Звездин, 2016 г.