

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

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

УДК 66.041.3-65:691.365

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ОБЖИГА ВЕРМИКУЛИТА ЗА СЧЕТ «НУЛЕВЫХ» МОДУЛЕЙ, НЕ ПОТРЕБЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Рассмотрены вопросы повышения энергетической эффективности электрических модульно-спусковых печей за счет использования тепловой эксергии вспучивающихся зерен вермикулита. Для создания благоприятных условий трансформации накопленной теплоты в энергию их окончательной дегидратации и структурообразования в конструкцию печи введен так называемый «нулевой» модуль, не потребляющий электрической энергии. В отличие от других вариантов этот дополнительный модуль является виброактивным и обеспечивает движение вспучивающихся зерен однослойным сплошным потоком без разрывов и зазоров. Такая структура потока позволяет наиболее эффективно использовать теплоту, накопленную вермикулитом и инертным материалом.

Ключевые слова: вермикулит, эксергия вермикулита, электрическая модульно-спусковая печь, виброактивный «нулевой» модуль, однослойный сплошной поток вермикулита.

ВВЕДЕНИЕ

До 50 % теплоты, поглощенной вермикулитом при обжиге, остается во вспученном при 700–750 °С материале, и эта энергия безвозвратно теряется, рассеиваясь в окружающую среду. Обзор публикаций по исследованиям вермикулита и вермикулитовым технологиям показал, что вопрос об использовании этой энергии прежде не ставился. Попытки создания аналитической модели кондуктивного переноса тепла по телу чешуек недовспученных зерен от их поверхности к центру авторами уже предпринимались, но с учетом анизотропии физических свойств, переменной структуры, массы и плотности зерен эта модель пока остается весьма приближенной. Однако по мере совершенствования электрических модульно-спусковых печей было найдено техническое решение — комплектация печных агрегатов так называемым «нулевым» модулем, не потребляющим электрической энергии. Главной задачей, которая решается за счет их применения, является снижение электрической мощности печи из-за пониженного температурного режима при неизменном качестве вспучивания.

Дополнительные неэлектрифицированные модули позволяют использовать «скрытую» в зернах вермикулита тепловую эксергию, накапливаемую ими в процессе теплоусвоения на этапе движения вермикулитового потока в электрифицированных модулях. Это энергосберегающая система вклю-

чает рекуператоры вторичных энергетических ресурсов — тепловой конвективной и лучистой энергии и дополнительный, так называемый «нулевой» термоизолированный модуль, использующий эту эксергию для завершения процессов дегидратации и структурообразования [1]. Система рекуперации в совокупности с термоизоляцией стенок обеспечивают поддержание высокой температуры в тепловых камерах дополнительного модуля, практически исключая потери внутренней эксергии, когда доvspучивающийся вермикулит находится в его рабочем пространстве, куда он входит на стадии частично не завершеного процесса теплоусвоения.

Далее последовал ряд конструктивных модификаций этого изобретения. Сначала была предложена печь с «нулевым» модулем Г-образной формы, увеличивающим время пребывания вермикулита в стадии перехода тепловой эксергии в механическую энергию структурообразования [2], затем — клиновидная форма «нулевого» модуля, способствующая минимизации возрастающих из-за разгона зазоров между зернами вермикулита за счет сужения рабочего пространства [3], но такая конструкция не может быть Г-образной и дополнительное время структурообразования в ней ограничено. Еще два технических решения позволили уменьшить потери тепловой эксергии вермикулита в рабочем пространстве «нулевого» модуля: в первом применена вакуумная камера на его нижнем торце, исключаяющая подсос холодного воздуха [4], во втором сбережение эксергии зерен достигается устранением доступа холодного воздуха за счет тепловой завесы, которая одновременно отделяет вермикулит потоком горяче-



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

го воздуха из рекуператоров от тяжелых частиц инертного материала при обжиге грубообогащенного сырья [5]. Но наибольшую эффективность сбережения эксергии вермикулита в процессе его дегидратации и завершения структурообразования дает дополнительный неэлектрифицированный модуль с вибрационным перемещением термообрабатываемого материала.

Цель работы состоит в создании «нулевого» модуля электрической модульно-спусковой печи, способного управлять временем энергообменных процессов для полного завершения дегидратации и структурообразования вермикулита с максимальным использованием накопленной эксергии.

УСТРОЙСТВО И РАБОТА ПЕЧИ

На рис. 1 показана печь с вибрационным модулем, использующим эксергию вермикулита для завершения его дегидратации и структурообразования. Печь содержит дозатор сырья материала 1 со спусковым лотком и барабаном. В корпусе печи под углом друг к другу расположе-

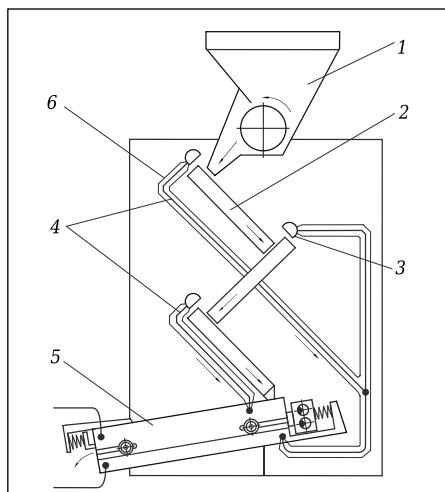


Рис. 1. Электрическая модульно-спусковая печь с вибрационным «нулевым» модулем

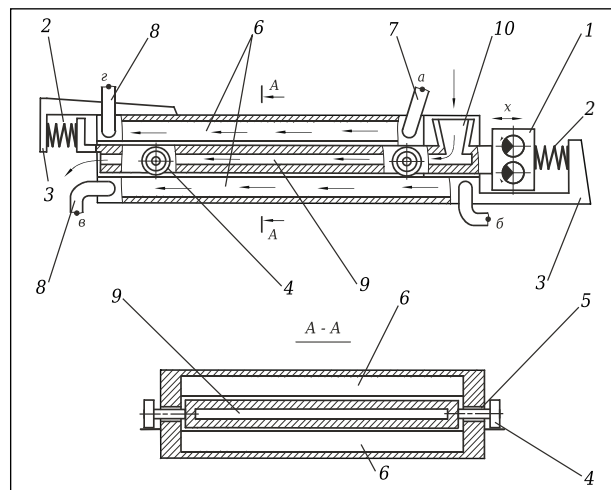


Рис. 2. Дополнительный «нулевой» модуль

ны электрифицированные модули 2 с рекуператорами тепловой энергии 3 и трубопроводами 4. Дополнительный модуль 5, расположенный под нижним электрифицированным модулем, в верхней части соединен с трубопроводами рекуператоров 3, а в нижней — с бункером-осадителем, снабженным вытяжным вентилятором (на рис. 1 не показаны). Для снижения теплопотерь трубопроводы покрыты термоизоляционным слоем 6.

Внутри «нулевого» модуля (рис. 2) размещен короб из жаростойкой стали с закрепленным на нем вибровозбудителем 1, поджатый цилиндрическими пружинами 2, упирающимися в выступы 3 корпуса дополнительного модуля. Короб содержит ролики 4, установленные на осях, которые выходят за пределы корпуса дополнительного модуля через прорези 5 в его боковых стенках и опираются на направляющие. В корпусе модуля имеются верхние и нижние тепловые камеры 6, утепленные термоизоляционным материалом (показан штриховкой), образующие пространство, в котором размещен короб. Тепловые камеры 6 сообщены с патрубками 7, которые в точках а и б присоединены через коллекторы к трубопроводам 4 (см. рис. 1), и с патрубками 8, которые в точках в и г присоединены к трубопроводам, сообщенным с вышеупомянутым бункером-осадителем, снабженным вытяжным вентилятором. Полые стенки модуля, заполненные теплоизоляционным материалом, образуют плоскую щелевидную камеру 9, сообщенную с раструбом 10.

Барабанный дозатор 1 (см. рис. 1) по спусковому лотку подает сырьевой материал, например вермикулитовый концентрат, на верхний электрифицированный модуль 2. Пересыпаясь с одного модуля на другой, материал подвергается воздействию теплового излучения, идущего с поверхностей электрических нагревателей. Но не вся излучаемая энергия поглощается вспучивающимся вермикулитом: часть энергии нагревает воздух и образует его конвективные потоки, выходящие из верхних торцевых частей модулей 2. Другая часть, отражаясь от основания и термокрышек и от самого вермикулита, выходит в виде теплового излучения через верхние торцевые части модулей. Рекуператоры 3, установленные вдоль верхних торцов модулей 2, «собирают» эту энергию и в виде разогретого воздуха с температурой 380–400 °С через изолированные трубопроводы 4 направляют ее за счет разряжения, создаваемого вытяжным вентилятором бункера-осадителя, в тепловые камеры 6 (см. рис. 2).

Тепловой режим печи подобран так, что вспучивающийся вермикулит входит в рабочее пространство короба «нулевого» модуля в состоянии незавершенности процессов дегидратации и теплоусвоения зерен. Благодаря наклону «нулевого» модуля и колебаниям короба, осуществляющимся в собственной плоскости за счет вибровозбудителя 1 и пружин 2 (см. рис. 2),

вермикулит движется к выходу из модуля некоторое время, определяемое средней скоростью вермикулитового потока. Наклон дополнительного модуля позволяет регулировать скорость в зависимости от размера зерен вермикулита и степени незавершенности процессов дегидратации и структурообразования.

ТЕПЛОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В «НУЛЕВОМ» МОДУЛЕ

При правильно подобранном температурном режиме электрифицированных модулей печи уровень запасенной в зернах эксергии окажется достаточным, чтобы теплообменные процессы полностью закончились и недовспученный вермикулит, вошедший в рабочее пространство короба «нулевого» модуля, полностью завершил свою дегидратацию и структурообразование. Основным теплообменным процессом осуществляется в зернах кондуктивным переносом тепла из внешних максимально нагретых слоев в глубинные слои, в которых дегидратация и структурообразование материала находятся еще в стадии развития. Время выравнивания температур на периферии и в центре недовспученных зерен, происходящего по плоскостям спайности, определяется по формуле [6]

$$\tau = 0,677 \frac{\delta^2}{\chi},$$

где δ — средняя толщина чешуйки вермикулитового зерна, м; χ — коэффициент ее теплопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Кондуктивный перенос тепловой эксергии, запасенной при нагреве в электрифицированных модулях, идет по телу чешуек от поверхности зерна к центру. Этот процесс через механическую работу вспучивания завершает структурообразование в глубинных слоях, если перенесенной энергии достаточно. Однако одновременно с поверхности зерна идет лучистый перенос на окружающие зерна и в рабочее пространство «нулевого» модуля. Потоки теплоты из камер δ (см. рис. 2), термоизоляция модуля и короба обеспечивают условия, при которых потери лучистой энергии зерен минимальны. Но они все-таки есть. При однослойном потоке вермикулита полностью заблокировать тепловое излучение зерен наружу невозможно, но при их максимальной концентрации на поверхности эти потери будут существенно ниже.

Второй теплообменный процесс — это лучистый и частично кондуктивный (в зонах контакта) перенос тепловой эксергии, идущий от относительно мелких вспученных зерен, теплоусвоение которых из-за их размеров завершилось еще до перехода в «нулевой» модуль, на крупные недовспученные зерна. Если мелкое зерно «наполнилось» теплотой в электрифицированном модуле в объеме, разрешенном его теплоемкостью, то в «нулевом» модуле оно начинает излучать с интенсивностью,

пропорциональной степени черноты его поверхностей. Торцевые и боковые (слиистые) поверхности зерен, согласно статичной аналитической модели [7], имеют различную излучательную способность, но средневзвешенное значение для единичного зерна любого размера равно $\varepsilon = 0,69$. Излучаемая мелкими зернами теплота компенсирует остывание поверхностей относительно крупных зерен, чем достигается усиление основного процесса — кондуктивного переноса тепла из внешних слоев в глубинные. Но эксергией она не является, так как не может вызывать механическую работу вспучивания крупных зерен, а лишь способствует ей.

Третий теплообменный процесс — лучистый перенос тепловой энергии частиц инертного материала на крупные зерна вермикулита [8]. Из-за более высокой истинной плотности и теплопроводности эти тяжелые частицы, присутствующие в концентратах в количестве 4–6 % [9–11], нагреваются раньше, чем мелкие зерна вермикулита, и, оказываясь в «нулевом» модуле, отдают свою теплоту [8].

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В ВЕРМИКУЛИТОВОМ МАССИВЕ

Ранее [8] были изучены временные аспекты этих энергетических процессов и установлена зависимость для расчета продолжительности прохождения вермикулитового потока через «нулевой» модуль, в течение которого эксергия, определяемая произведением

$$E = k_{\tau} Q_c, \quad (1)$$

завершит дегидратацию и структурообразование: Q_c — теплота нагрева «сухой» части минерала, полностью дегидратированного и вспученного (~552 кДж/кг [12]); k_{τ} — коэффициент полноты теплоусвоения, учитывающий долю этой поглощенной вермикулитом энергии.

Время термообработки в «нулевом» модуле определяется выражением [8]

$$t = 3t_m(1 - k_{\tau}) \cdot (Q_x + Q_b + Q_n + Q_r) / k_{\tau} Q_c, \quad (2)$$

где 3 — количество электрифицированных модулей; t_m — суммарное время движения вермикулита по трем электрифицированным модулям печи; Q_x — энергия высвобождения химически связанной воды (~197 кДж/кг); Q_b — энергия фазового перехода адсорбированной и гидратной воды (~259 кДж/кг); Q_n — энергия перегрева водяных паров (~119 кДж/кг); Q_r — теплота нагрева межслоевых адсорбированных газов (~82 кДж/кг) [12].

На рис. 3 показана зависимость t от k_{τ} , построенная по выражению (2). Значение $k_{\tau} = 0,54$ указывает предельную границу теплоусвоения, за пределами которой печь слишком «холодна» и восполнить недополученное тепло за счет эксергии невозможно. При $k_{\tau} = 0,54$ необходимое время составит 8,3 с, но даже при столь продолжи-

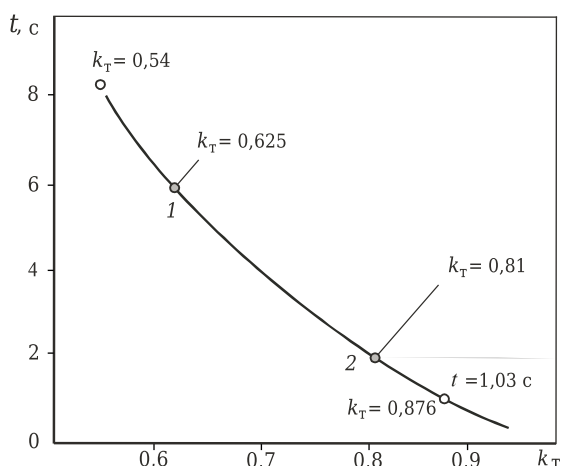


Рис. 3. Зависимость времени t термообработки в «нулевой» модуле от коэффициента полноты теплоусвоения k_T

тельном процессе лишь часть эксергии перейдет в механическую работу, потери неизбежны: при нагревании глубинных слоев остывающие внешние слои снижают интенсивность «перетекания» теплоты. Максимальное значение $k_T = 1$ соответствует полному теплоусвоению, когда «нулевой» модуль не работает. Для печи с Г-образным нулевым модулем было установлено значение $k_T = 0,876$, соответствующее $t = 1,03$ с (см. рис. 3) [8].

Запас энергии в зернах мелких фракций вермикулита не зависит от конструкции «нулевого» модуля [8]; и для Г-образного, и для вибрационно-модулей он одинаков. Тепловая энергия мелких фракций, с которой их зерна входят в «нулевой» модуль, зависит от долевого коэффициента, определяющегося гауссовым распределением размеров частиц исходного концентрата и весовой долей от-

носительно мелких фракций [8]. При долевым коэффициенте $k = 0,275$ запасенная энергия будет равна $Q_1 = k \cdot Q_c = 0,275 \cdot 552 = 152$ кДж.

Но это значение не является константой, и для других видов и размерных групп вермикулитовых концентратов может существенно варьироваться. Уже только поэтому продолжительность прохождения минерала по «нулевому» модулю должна регулироваться.

Теплота, усвоенная инертным материалом к моменту входа в «нулевой» модуль с учетом весовой доли вермикулита в концентрате $k_b \sim 0,95$, будет равна $Q_2 = (1 - k_b) \cdot Q_n = 0,95 \cdot 714,5 = 36$ кДж,

где Q_n — теплота нагрева 1 кг инертного материала, кДж.

В сумме источник тепловой энергии — инертный материал и мелкофракционный вспученный вермикулит, потенциально способный поддерживать температуру поверхности крупных зерен в «нулевом» модуле, имеет запас энергии 188 кДж.

Для Г-образного «нулевого» модуля с $t = 1,03$ с и $k_T = 0,876$ уровень эксергии, способной преобразоваться в энергию структурообразования, равен 71 кДж, а источник энергии в виде инертного материала и мелких зерен имеет запас в 2,65 раза больший [8]. Это показывает, что в реальном процессе инертный материал и мелкая фракция вермикулита потенциально способны поддерживать температуру, например 720 °С, на поверхности крупных зерен. Но это лишь вероятность. Тем не менее расчеты [8] показывают, что потребляемая мощность при уменьшении накала нагревателей электрифицированных модулей от 750 до 720 °С снижается от 103,1 до 91,5 кВт, т. е. на 11,25 %, а эксперименты на печи с Г-образным «нулевым» модулем подтвердили этот результат: снижение до 12,5 %. Но этот эффект снижения, по-видимому, объясняется в основном тем, что в данном случае «срабатывает» собственная эксергия крупных зерен. И вот почему.

На рис. 4 показаны исходный кластер с регулярной структурой, идеализированный и выделенный из однослойного массива, и кластер, измененный в процессе движения по наклонному Г-образному модулю. Движение зерен по наклонной поверхности под углом примерно 45° без учета встречного потока разогретого воздуха описывается дифференциальным уравнением

$$\ddot{x} = g \sin \alpha - f_n g \cos \alpha - 3\pi \zeta \frac{D}{m} \cdot \dot{x}, \quad (3)$$

где g — ускорение свободного падения (9,81 м/с²); α — угол наклона поверхности к горизонту; f_n — коэффициент трения материала по стали (~0,51); ζ — коэффициент динамической вязкости воздуха (при 20 °С $\zeta = 17,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с [13]). Решение уравнения (3) имеет вид

$$x = \frac{g(\sin \alpha - f_n \cos \alpha)}{3\pi \zeta \frac{D}{m}} t - \frac{g(\sin \alpha - f_n \cos \alpha)}{\left(3\pi \zeta \frac{D}{m}\right)^2} \left(1 - e^{-3\pi \zeta \frac{D}{m} t}\right), \quad (4)$$

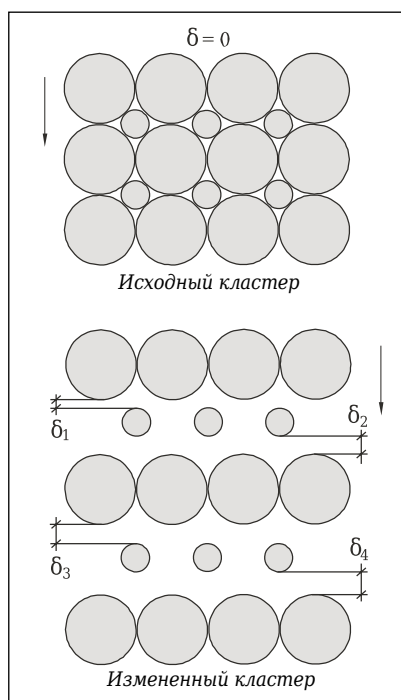


Рис. 4. Изменение зернового кластера в электрифицированном модуле печи

где D и m — средний диаметр и масса вспученного зерна для принятой размерной группы исходного вермикулитового концентрата (КВК-1, КВК-2, КВК-4 и др.).

Уравнение (4) описывает ускоренное движение частиц. Очевидно, что изменение среднего интервала δ (см. рис. 4) для каждой размерной группы вермикулита по мере движения зерен будет происходить по-разному. Решение уравнения (4) позволяет установить эти зависимости.

На рис. 5 показаны графики зависимости удельного интервала $\delta_{уд} = \delta / D$ от положения зерен вермикулита в «нулевом» модуле. В зоне пересыпания вермикулита через раструб 10 (см. рис. 2) в щелевидную камеру 9 (верхний кластер) среднее расстояние между зернами равно нулю. Но силы тяжести вызывают ускоренное движение, исходный кластер изменяется, интервалы δ возрастают, кондуктивный перенос из-за нарушения контактов прекращается, а интенсивность падающих потоков теплового излучения с мелких зерен на крупные уменьшается пропорционально соответствующим угловым коэффициентам [14]. Именно поэтому эффект снижения энергопотребления печи с Г-образным модулем мало связан с упомянутым выше запасом энергии 188 кДж и объясняется перетеканием внутрь собственной эксергии крупных зерен.

«Нулевой» модуль с вибрационным внутренним коробом обеспечивает движение однослойного массива вспучивающегося вермикулита без ускорения, поэтому структура исходного кластера (см. рис. 4) сохраняется на всем периоде движения. Конечно, если подача концентрата дозатором и производительность печи согласованы. Возможность управлять средней скоростью сыпучего материала при вибротранспортировании вблизи резонанса за счет изменения частоты возбуждения колебательной системы [15] позволяет настраивать «нулевой» модуль на требуемую продолжительность прохождения однослойного массива вермикулита в пространстве обжига. Это главное достоинство вибрационного модуля по сравнению со всеми ранее рассмотренными [1–5].

Возвращаясь к рис. 3, рассмотрим область возможных значений коэффициента полноты теплоусвоения на графике $t = f(k_T)$, в которой благодаря вибрационному движению материала может быть реализован широкий диапазон значений t , например от 2 до 6 с. Область лежит в диапазоне 0,625–0,81. При этих значениях уровни эксергии, накопленной в крупных зернах и способной завершить их дегидратацию и структурообразование, будут равны:

– при времени термообработки 6 с:

$$Q_1 = (1 - k_{T,1})k_x(Q_x + Q_b + Q_n + Q_r) = 0,375 \cdot 0,725 \cdot 657 = 178,6 \text{ кДж},$$

– при времени термообработки 2 с:

$$Q_2 = (1 - k_{T,2})k_x(Q_x + Q_b + Q_n + Q_r) = 0,19 \cdot 0,725 \cdot 657 = 90,5 \text{ кДж},$$

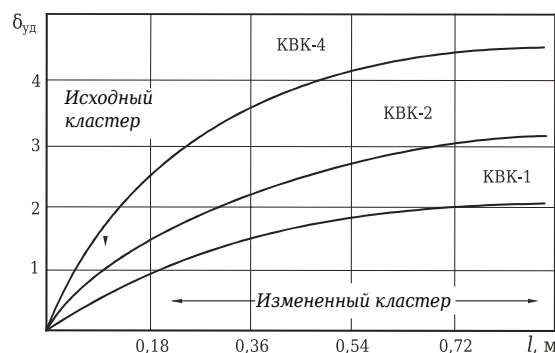


Рис. 5. Зависимость удельного интервала $\delta_{уд}$ между зернами от положения в «нулевом» модуле l

где $k_{T,1}$ и $k_{T,2}$ — коэффициенты полноты теплоусвоения в точках 1 и 2 (см. рис. 3); k_x — долевого коэффициент крупной фракции [8].

В отличие от Г-образного модуля в данном случае ввиду плотного прилегания компонентов вермикулитового потока часть запасенной в мелких зернах и частицах инертного материала энергии (188 кДж) может быть трансформирована в энергию дегидратации и структурообразования крупных зерен на стадии их завершения. Но никакие модельные представления не ответят на вопрос о том, какова эта часть и насколько снизится потребление электроэнергии. Учитывая один порядок этих энергий, можно сделать прогноз — 20–30%. И тогда уровни эксергии крупных зерен возрастут:

– при времени термообработки 6 с:

$$Q_1 = 0,25 \cdot 188 + 178,6 = 225,6 \text{ кДж},$$

– при времени термообработки 2 с:

$$Q_2 = 0,25 \cdot 188 + 90,5 = 137,5 \text{ кДж},$$

при среднем значении $Q_{ср} = 182 \text{ кДж/кг}$.

Это экономленнная эксергия для 1 кг вермикулитового концентрата.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ВИБРАЦИОННОГО «НУЛЕВОГО» МОДУЛЯ

При производительности трехмодульной электрической печи, взятой за аналог в работе [8], $1,75 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0,486 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$) и коэффициенте вспучивания $k_b = 8,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ [12] прохождение материала в пересчете на вермикулитовый концентрат через печь, в том числе через «нулевой» модуль, составит

$$P_g = P_v / k_b = 0,486 \cdot 10^{-3} / (8,5 \cdot 10^{-3}) = 0,0572 \text{ кг/с},$$

где P_v и P_g — объемная и весовая производительность печи соответственно.

Умножая $Q_{ср}$ на весовую производительность, получим дополнительно экономленнную электрическую мощность:

$$\Delta N = Q_{ср} P_g = 182000 \cdot 0,0572 = 10410,4 \text{ Вт} = 10,4 \text{ кВт}.$$

В других временных режимах — 6 и 2 с (см. рис. 3, крайние точки 1 и 2) снижение мощности будет равно 12,9 и 7,7 кВт.

С учетом вышеприведенных данных дополнительное снижение потребляемой электрической мощности печи от 91,5 до 12,9 и 7,7 кВт составит соответственно 14,1 и 8,4 % и только за счет иного способа организации движения вермикулита в «нулевом» модуле печи. Но это прогноз, требующий опытной проверки. К какому режиму, какому времени термообработки вермикулита в дополнительном неэлектрифицированном модуле он приведет, покажет эксперимент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая новые возможности, которые дает вибрационный «нулевой» модуль, — повышение уровня запасенной эксергии крупных зерен вермикулитового массива за счет плотности потока и энергии

Библиографический список

1. Пат. 146731 Российская Федерация, МПК F 27 В 9/06. Электрическая печь для обжига вермикулитовых концентратов / Нижегородов А. И.; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный технический университет (ФГБОУ ВПО ИРГТУ). — № 2014106540/02; заявл. 20.02.2014; опубл. 20.10.2014, Бюл. № 29.
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 национальный исследовательский технический университет (ФГБОУ ВО ИРНИТУ). — № 2015112982/02; заявл. 08.04.15; опубл. 20.08.15, Бюл. № 23.
3. Пат. 155942 Российская Федерация, МПК F 27 В 9/06. Электрическая печь для обжига вермикулитовых концентратов / Нижегородов А. И.; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный технический университет (ФГБОУ ВПО ИРГТУ). — № 2015108580/02; заявл. 11.03.15; опубл. 20.10.15, Бюл. № 29.
4. Пат. 156977 Российская Федерация, МПК F 27 В 9/06. Электрическая печь для обжига вермикулитовых концентратов / Нижегородов А. И.; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет (ФГБОУ ВО ИРНИТУ). — № 2015130460/02; заявл. 22.07.15; опубл. 20.11.15, Бюл. № 32.
5. Пат. 162418 Российская Федерация, МПК F 27 В 9/06. Электрическая печь для обжига вермикулитовых концентратов и конгломератов / Нижегородов А. И., Звездин А. В.; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет (ФГБОУ ВО ИРНИТУ). — № 2015155497/02; заявл. 23.12.15; опубл. 10.06.16, Бюл. № 16.
6. Расчет времени для выравнивания температуры. Вунивер.ру [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://vunivere.ru/work27956/page2> (31.01.2016).
7. 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.
8. 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.
9. Nizhegorodov, A. I. Transformation of vermiculite energy into mechanical transformation energy during firing in

melkikh zeren i inertnogo materiala, možno skazat', čto elektricheskie modulyjno-spuskovye pechi ostayutsya perspektivnymi energotekhnologičeskimi agregatami, i ne tol'ko dlya obžiga vermiculitovykh koncentratov i konglomeratov, no i dlya termoaktivatsii drugogo mineral'nogo syr'ya [16, 17].

V nastoyashchee vremya v tehnoparkе ИРНИТУ načato proektirovaniye eksperimental'nogo vibroaktivnogo modulya k elektricheskoj pechi, rabotayushchey na predpriyatii «Иркутский вермикулит». Совместные испытания и эксперименты покажут, насколько эффективным окажется новый «нулевой» модуль. Такими модулями можно дополнять конструкции электрических печей новой концепции — печей с подвижными подовыми платформами [18], что дополнительно уменьшит энергоемкость обжига вермикулита еще на 8–14 %.

electric furnaces with a «zero» module / A. I. Nizhegorodov, A. V. Zvezdin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 239–245.

9. Росгеолфонд. Ковдорское месторождение вермикулитовых руд [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rfgf.ru/license/itemview.php?iid=2659696> (25.07.2016).

10. Росгеолфонд. Татарское месторождение вермикулита. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rfgf.ru/bal/a/itemview.php?iid=328520> (25.07.2016).

11. Роснедра. Кокшаровское вермикулитовое месторождение [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rosnedra.gov.ru/article/2132.html> (25.07.2016).

12. Нижегородов, А. И. Технологии и оборудование для переработки вермикулита: оптимальное фракционирование, электрический обжиг, дообогащение / А. И. Нижегородов. — Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 2011. — 172 с.

13. Воздух [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/воздух> (10.08.2016).

14. Телегин, А. С. Тепломассоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. — 455 с.

15. Вибрации в технике: справочник в 6 т. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э. Э. Лавендела. — М.: Машиностроение, 1981. — 509 с.

16. Кременецкая, И. П. Амorfизация серпентиновых минералов в технологии получения магнезиально-силикатного реагента для иммобилизации тяжелых металлов / И. П. Кременецкая, А. Т. Беляевский, Т. Н. Васильева [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. — 2010. — № 1. — С. 41–49.

17. Кременецкая, И. П. Реагент для иммобилизации тяжелых металлов из серпентинсодержащих вскрышных пород / И. П. Кременецкая, О. П. Корытная, Т. Н. Васильева // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. — 2008. — № 4. — С. 33–40.

18. Нижегородов, А. И. Энергоэффективная электрическая печь с подвижной подовой платформой для обжига вермикулита / А. И. Нижегородов // Новые огнеупоры. — 2017. — № 2. — С. 19–24. ■

Получено 19.09.16
© А. И. Нижегородов,
А. В. Звездин, 2017 г.