Д. т. н. **А. И. Нижегородов** (✉)

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

УДК 666.7.041.3-65

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДУЛЬНО-СПУСКОВЫЕ ПЕЧИ С СИСТЕМОЙ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОБЖИГА ВЕРМИКУЛИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Рассмотрены возможности повышения энергетической эффективности электрических модульно-спусковых печей для обжига вермикулитовых концентратов. Дано обоснование введения в конструкцию печи дополнительного «нулевого» модуля, использующего вторичные энергетические ресурсы. Проведен анализ модели процесса теплоусвоения вермикулита, которая учитывает накопленную в нем тепловую эксэргию, поглощаемую по мере нагрева, и переходящую в «нулевом» модуле в энергию механической трансформации его зерен. Для уменьшения потерь этой эксэргии вермикулитом предложена оригинальная конструкция «нулевого» модуля и сделан прогноз энергетической эффективности таких печей.

Ключевые слова: *электрическая модульно-спусковая печь, обжиг, теплоусвоение, модуль обжига, «нулевой» модуль, удельная энергоемкость, КПД печи, вермикулитовый концентрат, вспученный продукт.*

Обжиг вермикулита в электрических модульно-спусковых печах имеет уже более чем десятилетний опыт. Каждый из этапов их развития внес новый вклад в повышение КПД этих агрегатов и уменьшение удельной энергоемкости обжига.

В процессе совершенствования, как это бывает и с другими сложными системами, часто появляются новые научные и сопутствующие им технические решения, которые позволяют поднять их на следующий уровень. Так, в работе [1] предложена и рассмотрена энергосберегающая система, включающая рекуператоры тепловой конвективной и лучистой энергии (вторичные энергетические ресурсы) и дополнительный «нулевой», термоизолированный, но не электрифицированный модуль, использующий вторичные энергетические ресурсы (ВЭР) для дообжига вермикулита, входящего в этот модуль на стадии частично не завершенного процесса теплоусвоения.

В настоящей статье на основе анализа новой модели, базирующейся на не принимавшейся ранее во внимание скрытой в зернах вермикулита тепловой эксэргии (она также рассматривается как ВЭР), накапливающей и увеличивающей свою долю в общем объеме энергии теплоусвоения, показана возможность ее кондуктивного переноса в глубинные слои зерен и преобразования в энергию дегидратации и механической трансформации вермикулита. Для минимизации потерь эксэргии предлагается иное конструктивное решение дополнительного модуля, максимально теплоизолирующего вермикулитовый поток.

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

Цель выполненных исследований состояла в изучении возможности повышения энергетической эффективности электрических модульно-спусковых печей и обосновании введения в конструкцию печи «нулевого» модуля, использующего ВЭР, а также в анализе модели процесса теплоусвоения вермикулита, учитывающей накопленную в нем тепловую эксэргию, переходящую в «нулевом» модуле в энергию механической трансформации его зерен.

Термин «эксэргия» означает качественную энергию, ее способность к совершению полезной работы в условиях отсутствия равновесия с окружающей средой, т. е. ту ее часть, которую можно преобразовать и использовать. Рассматриваемый частный случай особенный. Здесь теплота, накопленная в вермикулите непосредственно за счет кондукции, преобразуется в энергию дегидратации, фазового перехода, перегрева водяного пара и адсорбированных газов и приводит к совершению механической работы в глубинных слоях вермикулита [2].

В работе [3] показано, что примерно 45 % тепловой энергии, усвоенной вермикулитом, остается во вспученном и нагретом до 725–750 °С материале (θ_c). До сих пор эта часть энергии рассматривалась как потерянная, что соответствовало ранее принятой (теперь уже стандартной) модели, согласно которой теплоусвоение завершалось под действием внешнего источника лучистой энергии в момент окончания дегидратации и механической трансформации [2]. Но эта модель была приближенной.

Если процесс теплоусвоения прервать на выходе из печи с тремя электрифицированными модулями и перенести его окончание в дополнительный («нулевой») неэлектрифицированный модуль, использующий ВЭР, то можно сэкономить электроэнергию за счет использования тепловой эксэргии θ_c вермикулитовых зерен. При отсутствии внешнего источника лучистой энергии в условиях неполного теплоусвоения эта теплота, равная $k_э \cdot \theta_c$, где $k_э$ — коэффициент, учитывающий долю усвоенной вермикулитом энергии, будет переходить в глубинные слои его зерен, где дегидратация и вспучивание еще не завершились.

На рис. 1 показана схема печи с Г-образным «нулевым» модулем, которая обеспечивает эту возможность. Печь оборудована барабанным дозатором сырья *1* с бункером *2*, рифленым барабаном *3* и спусковым лотком *4*. В корпусе расположены электрифицированные модули обжига *5* с рекуператорами тепловой энергии *6*, установленные над торцевыми частями двух верхних модулей и соединенные с трубопроводами *7*. Дополнительный неэлектрифицированный Г-образный модуль *8* расположен под нижним электрифицированным модулем и снабжен патрубками *9*. Модули *5* и *8* имеют рамы *10*, опирающиеся на поперечины *11*, модули *5* закрыты термокрышками *12*, под которыми продольно размещены электрические нагреватели, закрепленные на токопроводящих головках *13*.

Рекуператоры тепловой энергии *6* выполнены в виде заглушенных полуцилиндров и перфорированы отверстиями, направленными в сторону торцов модулей *5*. Полуцилиндры имеют шероховатую зачерненную поверхность для максимального поглощения лучистой энергии, идущей от нагревателей через торцы модулей. Корпус печи имеет каркас *14*, термоизолированные стенки и дверцы (на рисунках условно сняты).

Между тепловыми камерами *1* «нулевого» модуля (рис. 2) расположены полости *2*, заполненные термоизоляционным материалом, между ними находится пространство обжига *3*. В тепловые камеры теплоноситель (горячий воздух) подводится по патрубкам *4* и *5* через коллекторы *6* и *7*. Отвод теплоносителя осуществляется через отверстия *8*, соединенные трубопроводами с бункером-осадителем, рукавными фильтрами и вентилятором (на рис. 2 не показаны). Корпус «нулевого» модуля образован металлическими листами *9* и ребрами *10*.

После прогрева печи и включения дозатора вермикулитовый концентрат подается на обжиг. Пересыпаясь с одного модуля *5* на другой (см. рис. 1), сырье подвергается воздействию теплового излучения, падающего на него с поверхностей электрических нагревателей *6* (см. рис. 2), нагревается и вспучивается. Однако не вся

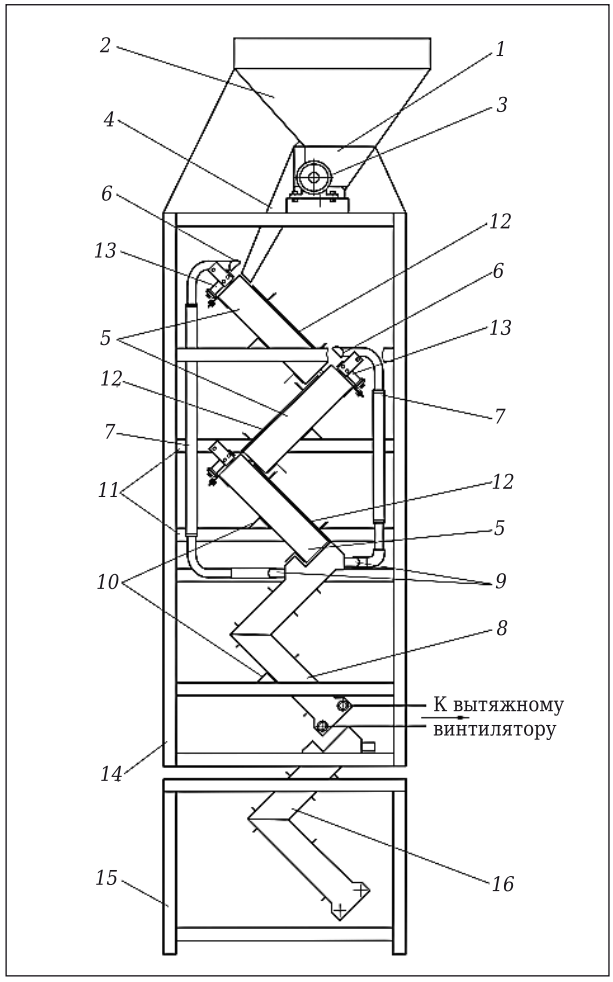

Рис. 1. Схема электрической модульно-спусковой печи с Г-образным «нулевым» модулем

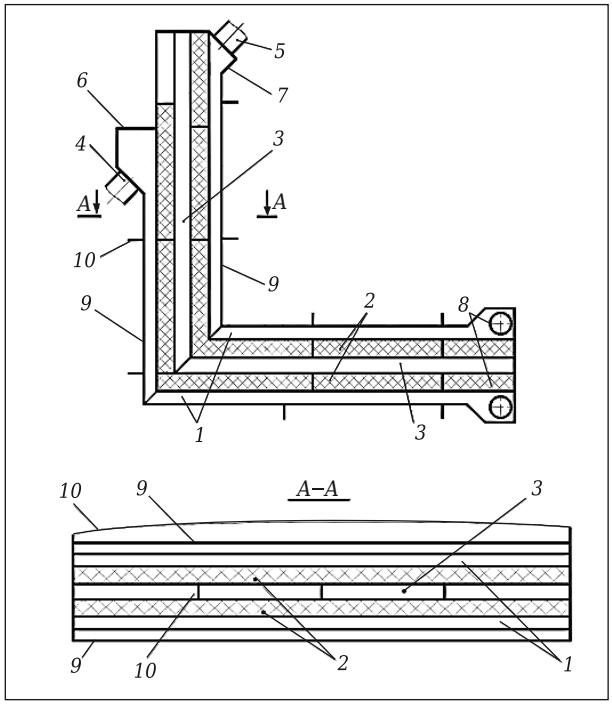

Рис. 2. Конструкция дополнительного Г-образного «нулевого» неэлектрифицированного модуля

излучаемая энергия поглощается потоком вермикулита. Часть энергии нагревает воздух, выходящий из верхних торцов модулей *5* (см. рис. 1). Другая часть, излучаемая нагревателями, а также отражаемая основанием и внутренними поверхностями термокрышек, выходит через торцы в виде лучистой энергии. Так образуются вторичные энергетические ресурсы. Рекуператоры тепловой энергии *6* «собирают» ее и в виде горячего воздуха (теплоносителя) с температурой 500–550 °С по трубопроводам *7*, патрубкам *9* (см. рис. 1) и коллекторам *6* и *7* (см. рис. 2) направляют за счет разряжения, создаваемого вытяжным вентилятором, в «нулевой» модуль. Здесь материал окончательно нагревается до требуемой температуры, получая тепловую энергию и в дополнительном модуле, за счет которого в зависимости от длины его участков продолжительность обжига увеличивается на 25–30 %. Температура нагревателей поэтому может быть уменьшена, так как вторичный энергетический ресурс — рекуперированная теплота повторно используется в Г-образном модуле. Из-за пониженного температурного режима теплоусвоение и сопутствующие процессы не успевают закончиться до выхода из нижнего электрифицированного модуля.

Далее недовспученный вермикулит поступает в пространство обжига, особенность которого состоит в том, что его внутренние поверхности обладают высокой отражательной способностью и оно со всех сторон изолировано высокоэффективным термоизоляционным материалом *9*. При этом тепловые камеры *8* выполнены снаружи. Такое устройство сводит к нулю теплообмен между находящимися в пространстве обжига зернами вермикулита и окружающей средой.

Стандартная модель базируется на полном завершении теплоусвоения при прохождении вермикулита во внешнем тепловом поле [2, 4] и выражается равенством, кДж/кг:

$$\theta_\Sigma = \theta_{100} + \theta_х + \theta_в + \theta_п + \theta_{а.г} + \theta_с, \quad (1)$$

где θ_{100} — теплота, усвоенная вермикулитом при предварительной температурной подготовке (100 °С), является начальным условием процесса и в дальнейшем анализе не учитывается; $\theta_х$ — теплота, которая идет на выведение химически связанной воды, $\theta_х \approx 197$ кДж/кг; $\theta_в$ — теплота фазового перехода физической (межслоевой) и гидратной воды, $\theta_в \approx 259$ кДж/кг; $\theta_п$ и $\theta_{а.г}$ — теплота, затрачиваемая на перегрев водяных паров и адсорбированных газов соответственно, $\theta_п \approx 119$, $\theta_{а.г} \approx 82$ кДж/кг; $\theta_с$ — теплота нагрева сухой части минерала, $\theta_с \approx 560$ кДж/кг. Суммарная усвоенная теплота θ_Σ в соответствии с формулой (1) равна 1209 кДж/кг.

Как отмечалось в работе [5], теплота $\theta_с$ не участвует в механической трансформации вермикулита и аккумулируется в зернах. Небольшую долю этой энергии вермикулит отдает остывающим при расширении перегретым водяными парам и газам, остальное уходит на нагрев бункера, металлоконструкций печи и рассеивается в окружающую среду. Другими словами эта теплота безвозвратно терялась: такова была стандартная упрощенная модель.

Новая модель рассматривает $\theta_с$ как скрытую эксэргию, возрастающую по мере нагрева вермикулита и способную через кондуктивный перенос проникать из внешних горячих слоев в глубинные слои зерен, где дегидратация и вспучивание еще только начались.

При незавершенном теплоусвоении на электрифицированных модулях печи уравнение баланса энергий (1) принимает вид

$$\theta'_\Sigma = k_э (\theta_х + \theta_в + \theta_п + \theta_{а.г} + \theta_с), \quad (2)$$

где $k_э$ — коэффициент, зависящий от температуры в рабочих камерах электрифицированных модулей и времени $t_м$ прохождения материала по ним.

При незавершенном теплоусвоении недостающее тепло

$$\Delta\theta = (1 - k_э)(\theta_х + \theta_в + \theta_п + \theta_{а.г}) \quad (3)$$

может быть восполнено эксэргией $k_э\theta_с$ в соответствии с равенством

$$k_э \theta_с = (1 - k_э)(\theta_х + \theta_в + \theta_п + \theta_{а.г}). \quad (4)$$

Из выражения (4) находим максимальное значение коэффициента $k_э$, при котором эксергия $k_э\theta_с$ покроет недостающее для дегидратации материала тепло $\Delta\theta$:

$$k_э = (\theta_х + \theta_в + \theta_п + \theta_{а.г}) / (\theta_х + \theta_в + \theta_п + \theta_{а.г} + \theta_с) = 0{,}54. \quad (5)$$

Полученное из формулы (5) значение $k_э = 0{,}54$ указывает, что уровень эксэргии в зернах составляет 54 % от усвоенной энергии, и этого будет достаточно для восполнения недостающих 46 %. Однако сделанный вывод экстремальный, так как вытекает из энергетического баланса, выражаемого суммой энергий (2) и (4), и не учитывает такого свойства энергии, как способность полностью преобразоваться в энергию механической трансформации вермикулита. Достаточно ли этой способности к совершению полезной работы, т. е. в данном случае к полноценному и окончательному вспучиванию материала?

Рассмотрим временные аспекты энергетических процессов, идущих при теплоусвоении. Следует учесть время «перекачки» энергии от внешнего источника

$$T_{па} = 3t_м$$

и дополнительное время движения вермикулита в «нулевом» модуле $t_{доп}$, в течение которого эксэргия зерен $k_э\theta_с$ будет завершать их теплоусвоение и механическую трансформацию, $T_{па}$ — постоянная времени печи с тремя электрифи-

цированными модулями обжига, отражающая время движения вермикулита по модулям и равная времени обжига.

Возьмем за основу трехмодульную опытно-промышленную печь с постоянной времени $T_{па}$ = = 2,72 с [4]. Разделение процесса теплоусвоения на два этапа с учетом формул (1), (2) и (4) дает уравнение

$$k_э\,(\theta_х + \theta_в + \theta_п + \theta_{а.г} + \theta_с)\cdot 3t_м + k_э\theta_с \cdot t_{доп} = (\theta_х + \theta_в + \theta_п + \theta_{а.г} + \theta_с)\cdot 3t_м,$$

решение которого относительно $t_{доп}$ дает время, необходимое для восполнения недостающих 46 % тепловой энергии для завершения механической трансформации вермикулита:

$$t_{доп} = \frac{1 - k_э}{k_э} \cdot \frac{\theta_х + \theta_в + \theta_п + \theta_{а.г}}{\theta_с} \cdot 3t_м. \qquad (6)$$

Выражение (6) показывает связь дополнительного времени от доли полного теплоусвоения вермикулита, отражаемой коэффициентом $k_э$, которую он получает при выходе из нижнего электрифицированного модуля и переходе в «нулевой» (см. рис. 1).

На рис. 3 показан график изменения дополнительного времени в зависимости от коэффициента $k_э$, построенный по выражению (6). Минимальное значение $k_э$ = 0,54 указывает границу допустимого теплоусвоения, ниже которого восполнить недополученное тепло за счет эксэргии $k_т\theta_с$ уже невозможно. Максимальное значение $k_э$ = 1 соответствует полному теплоусвоению, когда в печи нет «нулевого» модуля.

Таким образом, диапазон возможных значений $k_э$ получен, но как отыскать его оптимальное значение, при котором полное теплоусвоение вермикулита в энергосберегающей печи с «нулевым» модулем будет гарантировано? Создание аналитической модели кондуктивного переноса теплоты с поверхностных слоев вермикулитового зерна в его глубинные слои в анизотропном теле, каким оно является, с переменными структурой, массой и плотностью зерна, — чрезвычайно сложно. А учет того, что внутри зерен идет еще и лучистый перенос и есть влияние отраженных от соседних зерен потоков энергии, делает создание адекватной аналитической модели невозможным.

Обзор работ авторов 60-х годов, активно занимавшихся теоретическими и экспериментальными исследованиями вермикулита и технологий его обжига, показал, что такой вопрос ими даже не ставился [6–8]. Но попробуем обойти эту проблему.

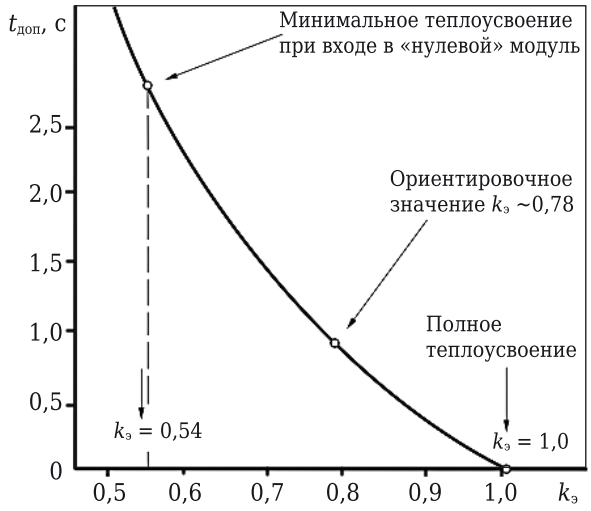

Рис. 3. Зависимость дополнительного времени $t_{доп}$ теплоусвоения в «нулевом» модуле от коэффициента $k_э$

Найти оптимальную точку на зависимости, показанной на рис. 3, нельзя, так как для этого нет аргументированного критерия. Но принять ориентировочное значение $k_э$ на данном графике, при котором кондуктивный перенос в глубинные слои вермикулитовых зерен был бы близок к максимально эффективному, все-таки можно.

Рассмотрим рис. 4. Экспериментальная кривая *1* дегидратации вермикулита [3] построена как относительная плотность $\rho_н/\rho_к$, где $\rho_н$ — на-

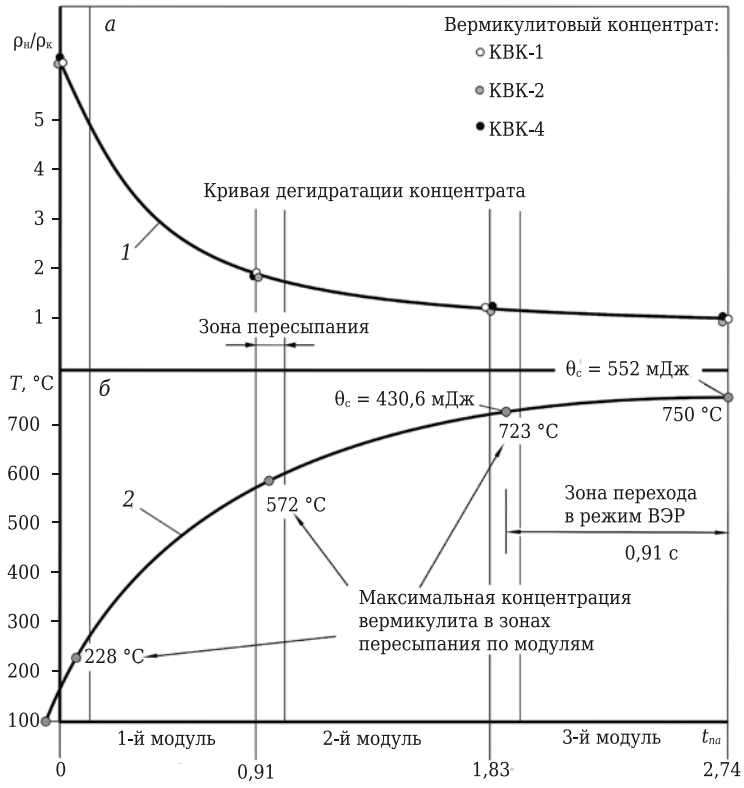

Рис. 4. Экспериментальная кривая дегидратации вермикулита (*1*) и распределение температуры вермикулитовых зерен в зонах пересыпания по модулям полностью электрифицированной печи (*2*)

чальная плотность исходного концентрата, $\rho_к$ — конечная плотность вспученного материала, распределенная по модулям электрифицированной модульно-спусковой печи. Для всех размерных групп концентратов эта зависимость укладывается практически точно в одну линию.

В зонах пересыпания вермикулита с одного модуля на другой (см. рис. 4) его концентрация максимальна благодаря нулевой скорости зерен, поэтому только в точках с указанной температурой можно было экспериментально измерить температуру материала. Во всех других точках горячий спай термопары оказывался частично оголенным, и его температура в значительной мере определялась падающим с нагревателей излучением. Но и эти температуры, показанные на кривой *2* рис. 4, отражают нагрев лишь поверхностных слоев зерен.

Из нижнего графика видно, что в зоне пересыпания 2-го модуля температура поверхности зерен достигает 572 °С, тогда как интенсивная дегидратация вермикулита начинается при 530 °С [6]. В зонах пересыпания отбирали пробы для взвешивания и определения плотности вермикулита. Именно по этим данным и построена кривая дегидратации концентрата (см. рис. 4, кривая *1*).

На рис. 5 представлены наиболее характерные зерна, отобранные из указанных зон, полученные при обжиге Ковдорского концентрата КВК-4. На рис. 5, *а* показано зерно с поверхностной температурой 572 °С. Вспученный внешний слой расщепил зерно на множество чешуек, оголились его относительно холодные внутренние слои, в которых дегидратация еще не произошла. В таком состоянии зерно поглощает в основном лучистую энергию от внешнего источника — полосовых нагревательных элементов. Кондуктивный перенос теплоты в глубинные слои пока незначителен.

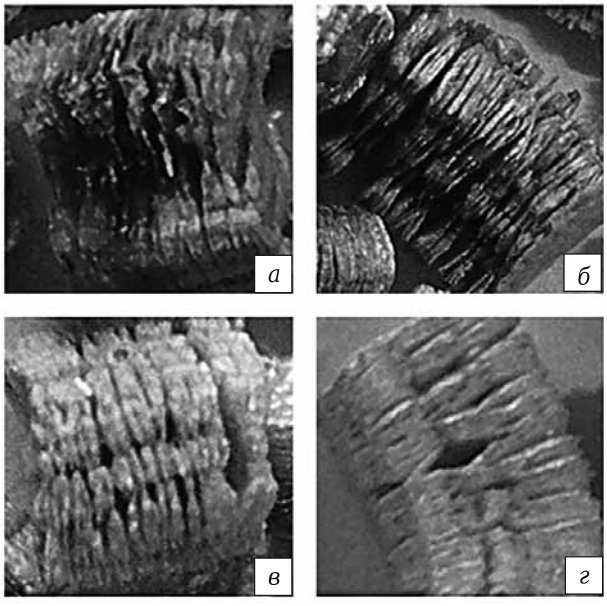

Рис. 5. Зерна (*а–г*), взятые из разных зон пересыпания трехмодульной электрической печи

Внешний вид зерна на рис. 5, *б* изменился (зона с температурой 723 °С). Межчешуйчатые щели частично закрылись, так как значительная часть глубинных слоев вспучилась. Именно это привело к тому, что уменьшение плотности значительно замедлилось, так как лучистая энергия из-за прикрывшихся щелей почти не проникает вглубь. Однако дегидратация и вспучивание продолжаются, и на этом этапе кондуктивный перенос тепла становится более значимым, так как температура поверхности приблизилась к максимальной температуре 750 °С — температуре нагревателей.

Зерно, показанное на рис. 5, *в*, достигло 750 °С по всему объему. Внутренние слои полностью вспучились, что привело к уменьшению видимых щелей между отдельными чешуйками. Особенно это заметно на рис. 5, *г*: полнота теплоусвоения привела к образованию многочисленных микропор (до 65 % от объема зерна [8]) во внутренних слоях и почти полному смыканию наружных чешуек зерна. Однако в действительности под увеличительным стеклом зазоры между чешуйками хорошо видны.

В одном килограмме таких зерен накоплено 552 кДж скрытой энергии (см. рис. 4), в данном случае не использованной в качестве ВЭР. Если снизить температуру нагревателей до 723 °С, то для завершения теплоусвоения и механической трансформации вермикулита печь необходимо дооборудовать «нулевым» модулем, как это показано на рис. 1, возможно, и дополнительным блоком *15* со вторым модулем *16*.

На рис. 4, кривая *2* видно, что разности температур 750–723 °С соответствует время 0,91 с, а на рис. 3 — что к этому времени $k_э = 0{,}78$. При этом значении $k_э$ величина эксэргии вермикулита на входе в «нулевой» модуль

$$\theta_c = 0{,}78 \cdot 552 = 430{,}6 \text{ кДж}.$$

Итак, новая модель теплоусвоения вермикулита при обжиге в электрических модульно-спусковых печах с дополнительным неэлектрифицированным «нулевым» модулем позволяет использовать новые возможности энергосбережения, во-первых, за счет частичного использования тепловой эксэргии зерен $k_э\theta_c$ для завершения дегидратации и механической трансформации вермикулита в «нулевом» модуле; во-вторых, вследствие уменьшения снижения потребления электроэнергии, обусловленного снижением температуры нагревательных элементов.

Недостающее тепло, определяемое выражением (3) для принятого аналога печи с тремя электрифицированными модулями и постоянной времени 2,72 с [5], равно:

$\Delta\theta = (1 - 0{,}78)\ (657) = 144{,}5$ кДж.

Тепловой эксэргии (430,6 кДж) почти на 300 % больше энергии (144,5 кДж), недостающей для завершения процесса дегидратации и вспучивания вермикулита.

Вышеуказанное снижение температуры нагревателей в соответствии с формулой

$$3\frac{I_{па}U}{f_н} = \sigma T_н^4,$$

где σ — постоянная Стефана – Больцмана, $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт /(м²·К); U — линейное напряжение сети, $U \approx$ ≈ 220 В, приведет к существенному снижению токовой нагрузки печи, снижению потребляемой мощности при неизменной производительности печи и увеличению КПД печного агрегата в целом.

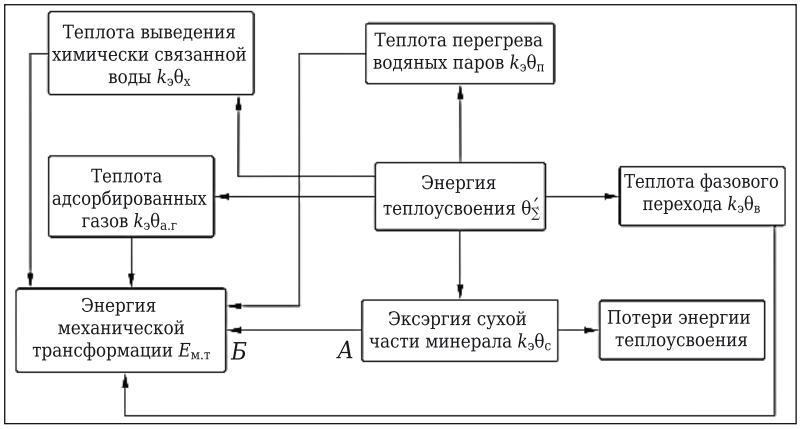

Рис. 6. Схема процессов теплоусвоения, дегидратации и механической трансформации вермикулита с учетом эксэргии сухой части минерала

На рис. 6 представлена схема процессов теплоусвоения, дегидратации и механической трансформации вермикулита с учетом эксэргии вермикулитовых зерен. В отличие от стандартной модели теплоусвоения [7, 8] в этой схеме имеется дополнительный канал *А – Б* преобразования теплоты сухой части вермикулита в механическую работу вспучивания. Наличие дополнительного канала дает возможность повышения КПД механической трансформации вермикулита относительно значения, свойственного стандартной модели (0,544) [5].

Анализ новой модели теплоусвоения с учетом скрытой в зернах вермикулита тепловой эксэргии, возрастающей по мере его нагревания, способной к кондуктивному переходу в глубинные слои зерен, позволяет дать оптимистический прогноз на существенное повышение энергетической эффективности таких печей. Для получения количественных показателей специальных печей с «нулевым» модулем — КПД и удельной энергоемкости обжига — нужны аналитические исследования и испытания опытно-промышленных образцов таких агрегатов.

В настоящее время в технопарке Иркутского национального исследовательского технического университета по договору с Институтом химии и технологии редких элементов и минерального сырья (ИХТРЭМС) Кольского научного центра РАН ведется изготовление энергосберегающей модульно-спусковой лабораторной печи. Совместные испытания и эксперименты покажут, насколько эффективным окажется метод использования вторичных энергетических ресурсов.

Библиографический список

1. ***Нижегородов, А. И.*** Развитие концепции энерготехнологических агрегатов для обжига вермикулитовых концентратов на базе электрических модульно-спусковых печей / *А. И. Нижегородов* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2014. — № 1/2. — С. 36–44.

2. ***Нижегородов, А. И.*** Совершенствование технологии обжига вермикулита в электрических модульно-спусковых печах / *А. И. Нижегородов* // Строительные материалы: technology. — 2011. — № 5. — С. 62–64.

3. ***Нижегородов, А. И.*** Альтернативная концепция энерготехнологических агрегатов для обжига вермикулита на базе электрических модульно-спусковых печей / *А. И. Нижегородов* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2014. — № 1/2. — С. 48–55.

4. ***Переверзев, В. Н.*** Некоторые результаты изучения физико-химических свойств вермикулита / *В. Н. Переверзев* // Материалы совещания по проблемам вермикулита. — Апатиты : Изд-во АН СССР, 1966. — С. 253, 254.

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

6. ***Кальянов, Н. Н.*** Вермикулит и изделия из термовермикулита и вермикулитобетона / *Н. Н. Кальянов*. — М. : Стройиздат, 1959. — 114 с.

7. ***Климашевский, Э. Л.*** Изучение некоторых физико-химических свойств кокшаровского вермикулита / *Э. Л. Климашевский, Л. А. Бойко* // Исследование и применение вермикулита. — М. : Наука, 1969. — С. 208–215.

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

Получено 19.05.15
© А. И. Нижегородов, 2015 г.