Д. т. н. **А. И. Нижегородов** (✉)

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

УДК 666.7;66.041.3-65:691.365

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПЕЧЬ С ПОДВИЖНОЙ ПОДОВОЙ ПЛАТФОРМОЙ ДЛЯ ОБЖИГА ВЕРМИКУЛИТА

Рассмотрена новая концепция энерготехнологических агрегатов — электрических печей с подвижной подовой платформой, предназначенных для обжига вермикулитовых концентратов и термоактивации других минералов. Приведены доказательства положений новой концепции, обеспечивающей их высокую энергоэффективность. Дан прогноз на снижение удельной энергоемкости обжига вермикулита до 40 мДж/м^3.

Ключевые слова: *электрическая печь с подвижной подовой платформой, концентрация вермикулита, производительность, удельная энергоемкость обжига.*

С появлением технологии электрического обжига вермикулита (2003 г.) актуальна потребность в снижении энергоемкости этого процесса. Модульно-спусковые печи подвергались усовершенствованию, по мере наработки опыта их эксплуатации появлялись новые технические решения. Прогноз по печам с рекуперацией тепловой энергии и последовательно-параллельным сопряжением электрифицированных и так называемых «нулевых» модулей (ППС-печи), приведенный в работе [1], показал возможность достижения удельной энергоемкости обжига вермикулита 173–175 мДж/м^3.

Однако этого недостаточно. Электроэнергия обходится дороже, чем энергия сжигаемого углеводородного топлива, которая используется в традиционных огневых печах. Поэтому кроме Иркутской области и Красноярского края, где превалирует гидроэлектроэнергетика, обеспечивающая дешевую электроэнергию, применение таких печей все-таки экономически невыгодно. Экологическая безопасность технологии электрического обжига при этом не является весомым аргументом для предпринимателей. Вот и появилась новая концепция высокоэффективных энерготехнологических агрегатов — электрических печей с подвижной подовой платформой, способная привести к снижению удельной энергоемкости обжига до 40–45 мДж/м^3.

Цель данной работы состоит в представлении и доказательстве положений новой концепции, обеспечивающей высокую энергоэффективность электрических печей с подвижной подовой платформой, и рассмотрении других преимуществ. В работе [1] были намечены, а здесь окончательно сформулированы эти положения и преимущества:

1 — устранение фактора модульности, исключающего возможность дальнейшего и существенного повышения энергоэффективности печи;

2 — высокая концентрация вспучиваемого вермикулита, находящегося на поверхности подовой платформы в тепловом поле при условии однослойности потока;

3 — постоянство средней скорости движения вермикулита в тепловом поле при возможности ее регулирования;

4 — возможность настройки продолжительности обжига;

5 — исключение контакта вермикулита с электрическими нагревателями;

6 — равномерность распределения температур по ширине подовой платформы.

На рис. 1–3 показано устройство печи с подвижной подовой платформой. Рабочая поверхность *1* из жаростойкой стали размещена на каркасе *2*, выполненном из пустотелых балок. Пустоты каркаса, собранного с помощью винтов, заполнены теплоизоляционным материалом *3*, сам каркас закреплен на подвижной подовой платформе *4*. Печь имеет электрические нагреватели *5*, термокрышку с защитным щитком *6*, эксцентриковый привод, содержащий эксцентрик *7*, корпус с цилиндром *8*, пустотелый плунжер *9* и вставленную в него пружину *10*. Цилиндрические *11* и конические *12* пружины установлены с обеих сторон платформы, снабженной осями *13* и роликами *14*, размещенными в направляющих *15* рамы. Платформа также выполнена из балок, сваренных со швеллерами *16*.

Термокрышка установлена на раме с помощью шарнира *17* и поперечных балок *18* над

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

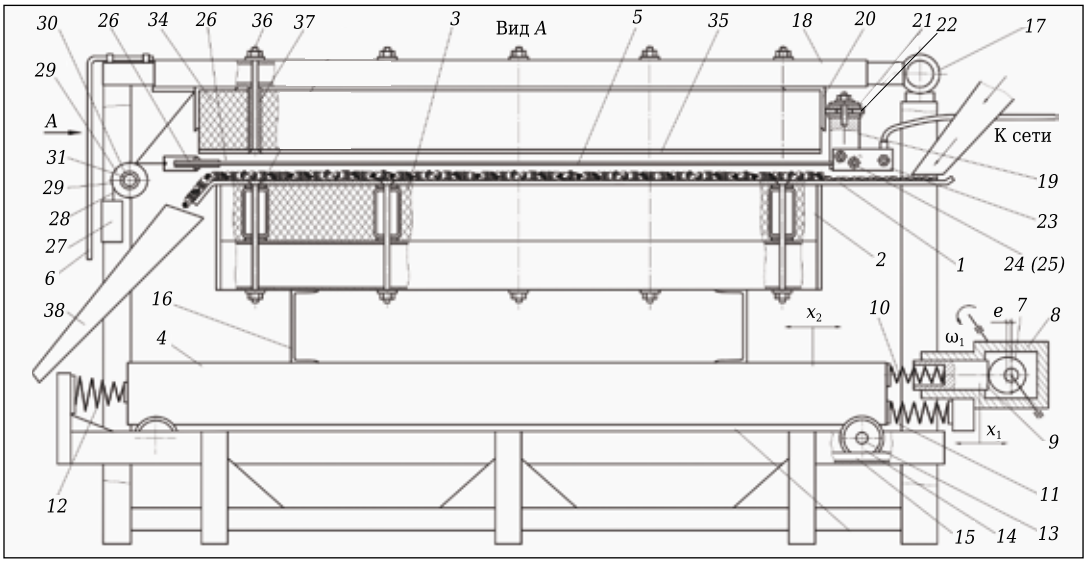

Рис. 1. Устройство печи с подвижной подовой платформой

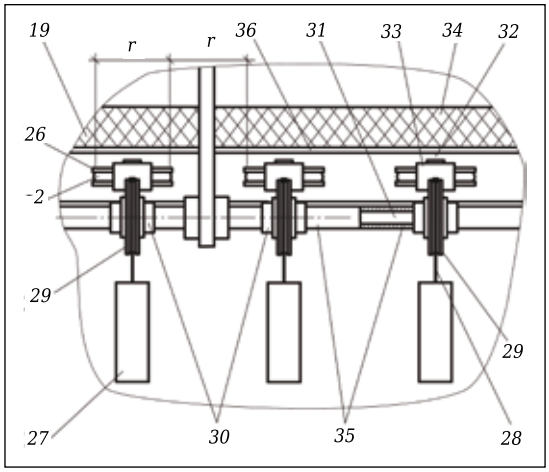

Рис. 2. Вид *А* (фрагмент с вырезом в защитном щитке)

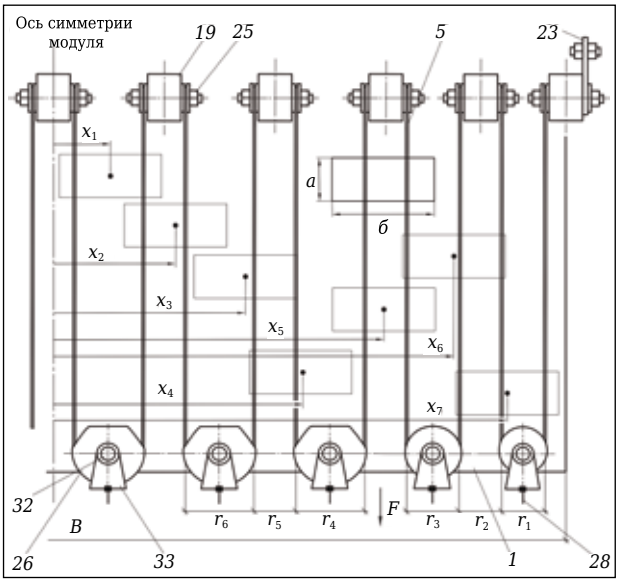

Рис. 3. Схема закрепления, распределения и натяжения электрических нагревателей на крышке печи

рабочей поверхностью с возможностью открывания при повороте на угол 180° для доступа к нагревателям. Крепежные головки *19* жестко прикреплены к уголку *20* термокрышки через диэлектрические прокладки *21* и *22* и имеют зажимные пластины *23*, с помощью которых резьбовыми соединениями *24* и *25* нагреватели *5* закреплены на одной стороне термокрышки. С другой стороны размещены блоки *26* из жаростойкой стали, которые служат для удержания электрических нагревателей в натянутом состоянии силой *F* (см. рис. 3). Натяжение обеспечивается грузами *27*, подвешенными на стальных канатиках *28*, пропущенных через блоки *29*, имеющие диэлектрические втулки *30* (см. рис. 2), посаженные на горизонтальную ось *31*, закрепленную на термокрышке. Блоки *29* благодаря втулкам *30* установлены с неодинаковым по ширине шагом *r*. Нагреватели выполнены из проволочного нихрома, чем достигается (по сравнению с полосовым) уменьшение пространства обжига между рабочей поверхностью и отражательной пластиной. Блоки *26* установлены в горизонтальной плоскости и посажены на оси *32*, выполненные из диэлектрического материала, которые через траверсы *33* соединены со стальными канатиками *28* (см. рис. 2).

Термокрышка, как и каркас, заполнена термоизоляционным материалом *34* и содержит пластину *35* из полированной жаростойкой стали, обладающей высокой отражательной способностью. Пластина закреплена на термокрышке винтами *36*, с помощью которых и благодаря втулкам *37* обеспечивается параллельность пластины *32* термокрышке и рабочей поверхности *1*. Чтобы под действием высокой температуры не происходило коробление рабочей поверхности и отражательной пластины, они должны быть выполнены составными.

Такое устройство печи отвечает первому положению новой концепции об устранении фактора модульности.

При работе печи электрические нагреватели, подключенные к сети, прогревают пространство обжига, образованное рабочей поверхностью *1* и отражательной пластиной *35*. Быстрому прогреву, поддержанию высокой температуры и минимизации потерь тепловой энергии способствует высокая отражательная способность отражательной пластины и рабочей поверхности *1*, низкая теплопроводность термоизоляционных материала и прокладок, установленных между балками каркаса. Нагреватели *5*, закрепленные на крепежных головках *19*, нагреваются до 700–800 °С и вытягиваются. Блоки *26*, через которые протянуты нагреватели, через термостойкие оси *32*, траверсы *33* и стальные канатики *28*, пропущенные через блоки *29* с диэлектрическими втулками *30*, посаженными на горизонтальной оси *31*, сопряжены с вертикально висящими грузами *27*. Последние, создавая натяжение силой *F*, исключают провисание электрических нагревателей *5*.

Регулируемый по частоте привод эксцентрика *7* (на рис. 1–3 не показан) создает возвратно-поступательное движение x_1 плунжера *9* в цилиндре корпуса *8*, сжимающего-разжимающего пружину *10* с частотой возбуждения f_1, Гц, и создает горизонтальные колебания x_2 подовой платформы *4* с рабочей поверхностью *1* и находящимся на нем вспучиваемым вермикулитом. Концентрат подается барабанным дозатором (на рис. 1–3 не показан) на правую часть поверхности *1* так, что, вспучиваясь, зерна вермикулита располагаются в непосредственной близости друг к другу.

Согласованная работа дозатора и привода гарантирует высокую концентрацию вермикулита на поверхности подовой платформы, обеспечивая второе положение концепции.

Платформа совершает однонаправленные колебания, перекатываясь на роликах *14* в направляющих *15*. Совокупная жесткость цилиндрических *10*, *11* и конических *12* пружин и масса подовой платформы с каркасом (масса вермикулита не учитывается) определяют собственную частоту колебаний f_2, Гц, системы пружины – платформа.

При вращении эксцентрика с частотой f_1, равной частоте собственных колебаний f_2, система пружины – платформа вводится в резонанс, устанавливаются несимметричные колебания, обусловленные нелинейной характеристикой упругости конических пружин *12*. Любая колебательная система, имеющая нелинейные пружины с одной стороны, обладает, так называемой мягкой амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), резонансный пик которой загнут влево [2, 3]. Данная система пружины – платформа также имеет мягкую АЧХ. Вход в резонансный режим происходит в момент, когда f_1 становится равной собственной частоте f_2. При этом платформа начинает совершать колебания с возросшей в 5–10 раз амплитудой.

График колебаний платформы показан на рис. 4. Очевидно, что это несимметричные колебания, при которых, как известно, возникает односторонний транспортный эффект. Они характеризуются тем, что максимальное абсолютное ускорение, направленное вправо, не равно максимальному абсолютному ускорению, направленному влево. Если максимум ускорения влево $\ddot{x}_{\max Л}$ больше (как в данном случае), чем максимум ускорения вправо $\ddot{x}_{\max П}$, и при этом будет выполняться условие [2, 3]

$$\ddot{x}_{\max П} > \mu G / m > \ddot{x}_{\max Л},$$

то частица и весь поток вермикулитовых зерен будут двигаться влево без отрыва от рабочей поверхности *1*, при этом движение будет иметь однонаправленный пульсирующий характер с некоторой средней скоростью (μ — коэффициент трения вермикулита по металлической поверхности; *G* — вес вермикулитовой частицы, Н; *m* — масса вермикулитовой частицы, кг).

В резонансе изменять амплитуду колебаний платформы можно за счет расстройки частоты эксцентрика f_1 и собственной частоты f_2. При этом амплитуда колебаний системы может изменяться от максимума до амплитуды дорезонансного режима. Таким образом происходит управление виброперемещением x_2, амплитудой виброскорости ωA и амплитудой виброускорения $\omega^2 A$ колебательной системы (где $\omega = 2\pi f$), обеспечивается изменение средней скорости движения вермикулита по рабочей поверхности *1* подовой платформы и управление временем обжига.

Несимметричные колебания подвижной подовой платформы, вызывающие транспортный эффект, обеспечивают третье и четвертое положения о постоянстве средней скорости вер-

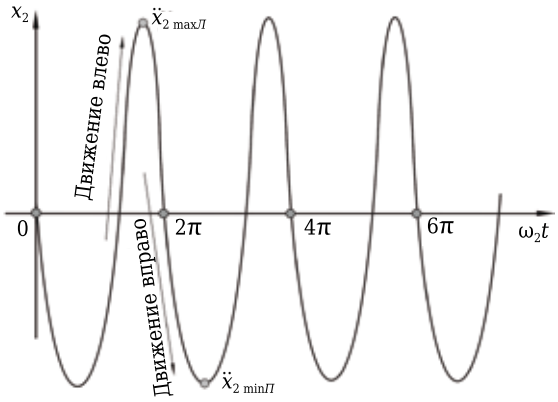

Рис. 4. График виброперемещений колебательной системы пружины – платформа

микулита, ее регулировании и возможность настройки продолжительности обжига.

Подбирая продолжительность обжига и температуру электрических нагревателей, можно настроить работу печи на требуемый режим в зависимости от фракционного состава вермикулитового концентрата и его вида.

Вспучивающиеся вермикулитовые зерна находятся под непосредственным тепловым излучением, идущим от электрических нагревателей *5*, рабочей поверхности *1* и отражательной пластины *35*, поглощают эту энергию, вспучиваются и в готовом виде выходят из печи по лотку *38*. Вместе с тем поток вермикулита находится под электрическими нагревателями, а не между ними в продольных камерах, как в электрических модульно-спусковых печах [4].

Эта особенность печи реализует пятое положение новой концепции — устраняет непосредственный контакт вермикулита с электрическими нагревателями, исключая образование нагара на них, что часто имеет место в электрических модульно-спусковых печах и приводит к отказу в работе [5].

В статье [1] показано, что увеличение концентрации зерен вермикулита на рабочей поверхности в пространстве обжига от 10208 до 11261 шт./м^2 (10,3 %) приводит к снижению удельной энергоемкости процесса на 6,2 %. Теперь сравним расчетные концентрации на модулях трехмодульной опытно-промышленной печи, рассмотренной в работе [1], и на подвижном поде новой электрической печи.

Трехмодульная печь при средней продолжительности обжига t = 2,84 с и производительности $П_V$ = 1,75 м^3/ч имела размеры модуля — ширина B = 0,96 м, длина L = 0,89 м (0,96 × 0,89). В пересчете на вспученный материал суммарный объем зерен, одновременно находящихся на трех модулях печи, равен:

$$V_\Sigma = П_V t \cdot (1 - 0{,}365) / 3600, \qquad (1)$$

где 0,365 — коэффициент пористости массива вспученного вермикулита [6]; $П_V$ / 3600 — перевод размерности производительности м^3/ч в м^3/с.

Суммарный объем составляет 876600·10^{-9} м^3, а объем одного зерна $V_з$, вспученного из частицы со средним условным диаметром D = 4 мм, равен 33,5·10^{-9} м^3.

Количество одновременно находящихся в печи зерен m = 876600 / 33,5 = 26167.

Количество зерен на одном модуле m_1 = 26167 / 3 = 8722.

При рядной структуре расположения зерен на поверхности (это модель регулярной структуры вермикулитового потока, принятая в работе [1]) среднее расстояние между осями зерен (шаг) δ = 0,0107 м, а зазор между ними 0,0067 м. Концентрация вермикулита на одном модуле равна $к_{3м}$ = 8722 / (0,96×0,89) = 10208 шт./м^2.

В новой печи движение вермикулитового потока организовано так, что соблюдается равенство δ = D, при котором зерна прилегают друг к другу и занимают всю поверхность подвижной подовой платформы. Пусть ее размеры равны размерам модуля 0,96 × 0,89 м. Тогда количество зерен по ширине B и длине L платформы будет равно:

$n_1 = B / D$ = 960 / 4 = 240,

$n_2 = L / D$ = 890 / 4 = 222.

Общее количество зерен на подовой платформе будет равно 53280 шт., а концентрация вермикулита, определяемая отношением $к_п$ = = 53280 / (0,96×0,89) = 62359 шт./м^2, увеличится в 6 раз.

Пусть время движения вермикулита по платформе будет не менее 3 с при эквивалентных температурных условиях (на поверхности нихрома ~ 750 °С). Следовательно, виброприводъ подовой платформы должен обеспечивать среднюю скорость движения вспучивающихся зерен $v_{ср}$ = 0,3 м/с. Это значительная скорость для вибротранспортирования сыпучих материалов по горизонтальным поверхностям, но она может быть достигнута не только оптимальным выбором параметров колебательной системы пружины – платформа, но и наклоном платформы в сторону движения вермикулита [3].

Исходя из формулы (1) производительность печи $П_V$, м^3/ч, будет равна:

$$П_V = \frac{V_\Sigma \cdot 3600}{t \cdot (1 - 0{,}365)} = \frac{53280 \cdot 33{,}5 \cdot 10^{-9} \cdot 3600}{3 \cdot 0{,}635} = 3{,}36.$$

Если в опытно-промышленной трехмодульной печи размеры модуля равны размерам подовой платформы, то потребление электроэнергии новой печью должно уменьшиться втрое, так как вместо трех комплектов нагревателей в ней будет только один. Вместе с тем при примерно равных температурных условиях (~ 750 °С) и несколько большей продолжительности обжига (3 с против 2,84 с) производительность возрастает от 1,75 до 3,36 м^3/ч.

Удельная энергоемкость обжига вермикулитовых концентратов в опытно-промышленной печи в среднем по разным размерным группам концентратов $e_{3м}$ = 250,1 мДж/м^3 [1]. Тогда этот показатель у новой печи с подвижной подовой платформой должен быть равен:

$$e_п = \frac{e_{3м} П_V}{3 \cdot П_{Vп}} = \frac{250{,}1 \cdot 1{,}75}{3 \cdot 3{,}36} = 43{,}4 \text{ мДж/м}^3.$$

При этом можно ожидать, что удельная энергоемкость новой печи относительно наиболее совершенной электрической ППС-печи с «нулевыми» модулями, работающими на рекуперированной тепловой энергии [1], уменьшится в 4 раза (175 / 43,4 = 4,03), абсолютное потребление электроэнергии будет составлять 36–38 кВт.

На рис. 5 показано изменение удельной энергоемкости и производительности при переходе от электрических модульно-спусковых печей к новым печам с подвижной подовой платформой.

Графики на рис. 5 наглядно показывают преимущества печей новой концепции и переход в новому качеству энерготехнологических агрегатов для обжига вермикулита. Эти результаты обусловлены реализацией двух основных положений новой концепции — устранением модульности и значительным повышением концентрации вермикулита на подовой платформе при сохранении однослойности потока сыпучей среды.

При удельной энергоемкости обжига 40–45 мДж/м^3 электроэнергия уже не будет обходиться дороже, чем энергия сжигаемого углеводородного топлива, которая используется в традиционных огневых печах с энергоемкостью 260–300 мДж/м^3 [7] (уменьшение в 6,0–6,5 раза), и эксплуатировать такие печи можно будет в любых регионах страны.

Еще одним (шестым) положением новой концепции является обеспечение равномерности распределения температур по ширине подовой платформы.

Измерение температур нагревателей и огнеупорной поверхности внутри продольных камер в модульно-спусковых печах показало [6], что в пристеночных зонах модулей температуры ниже, чем в центре. Это обстоятельство приводит к тому, что вермикулит на выходе из печи по краям остается частично недовспученным: отклонение насыпных плотностей вермикулита, выходящего в центре и по краям, составляет 3–5 %.

Для устранения этого недостатка ширину продольных камер в пристеночных зонах приходилось делать меньше, чем в центре, но при этом необходимо было, чтобы самые узкие камеры удовлетворяли условию

$$r_{\min} \approx (9 \div 15)\, D, \qquad (2)$$

где D — средний условный диаметр частиц исходного вермикулитового концентрата, определяющий его размерную группу [6]. Условие (2) исключает образование заторов вермикулита в продольных камерах, но в модульно-спусковых печах для соблюдения этого условия необходимо увеличивать шаг установки электрических нагревателей, что существенно снижает температуру основания между ними. Расположение электронагревателей над вермикулитовым потоком (см. рис. 1) в новой печи позволяет не беспокоиться о соблюдении условия (2).

Рассмотрим схему закрепления, распределения и натяжения нагревателей на крышке печи (см. рис. 3, показана половина крышки). Крепежные головки *19* имеют одинаковую ширину, определяющую шаг r_5. Шаг $r_4 = r_6$ между головками больше, чем r_5, но это обусловлено

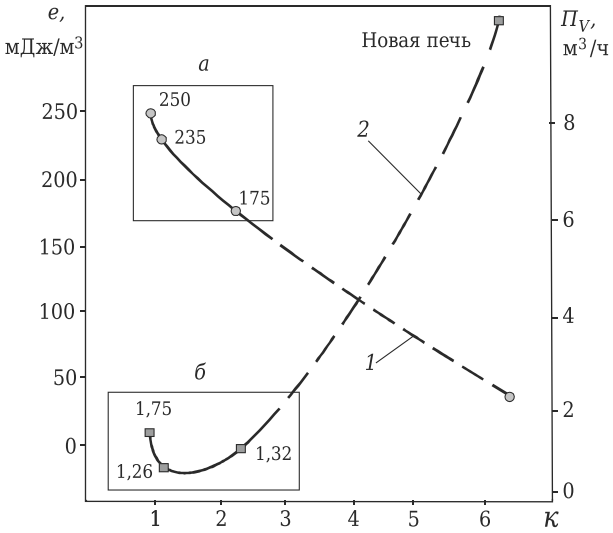

Рис. 5. Изменение удельной энергоемкости (*1*) и производительности (*2*) при переходе от электрических модульно-спусковых печей (ЭМСП) к печам новой концепции: *а* — область значений энергоемкости; *б* — производительности ЭМСП. Пунктиром обозначена область виртуальных печных агрегатов, занимающих промежуточное конструктивное состояние

удобством доступа к резьбовым соединениям *25*. При использовании головок с профрезерованными пазами, позволяющими при разборке не вытягивать шпильки вдоль своих осей, а вынимать их вместе с шайбами и гайками в собранном виде [8], конструкцию креплений можно сделать так, что шаг нагревателей в центральной части будет равным $r_4 = r_5 = r_6$.

В пристеночных зонах шаг переменный: $r_3 > r_2 > r_1$. Этим достигается бóльшая мощность тепловых потоков, падающих на вспучивающийся вермикулит, находящийся на подвижной подовой платформе.

Возьмем условную (виртуальную) рамку размерами $a \times b$. Пусть эти размеры таковы, что при любом положении рамки в центральной части (координаты центра рамки $x_1, \ldots, x_5$) она охватывает только два электрических нагревателя. При переносе рамки в пристеночную зону она будет охватывать уже три нагревателя (x_6 и x_7). Если потребляемая мощность печи составляет 37000 Вт, то при двадцати нагревателях на каждый из них придется 1858 Вт. Пусть размер a рамки равен 0,1 м при длине нагревателя 0,89 м. Тогда, с учетом допущения, что вся электрическая энергия преобразуется в тепловую, можно рассчитать мощность теплового потока, падающего на вермикулит внутри одной рамки в зависимости от ее положения:

– $x = x_1, \ldots, x_5$: мощность в центральной зоне равна $N_{\text{ц.з}} = 2 \cdot 1858 \cdot 0{,}1 / 0{,}89 = 417{,}5$ Вт;

– $x = x_6 = x_7$: мощность в пристеночной зоне равна $N_{\text{п.з}} = 3 \cdot 1858 \cdot 0{,}1 / 0{,}89 = 626{,}3$ Вт.

Распределение мощности теплового потока, падающего с поверхностей электрических нагре-

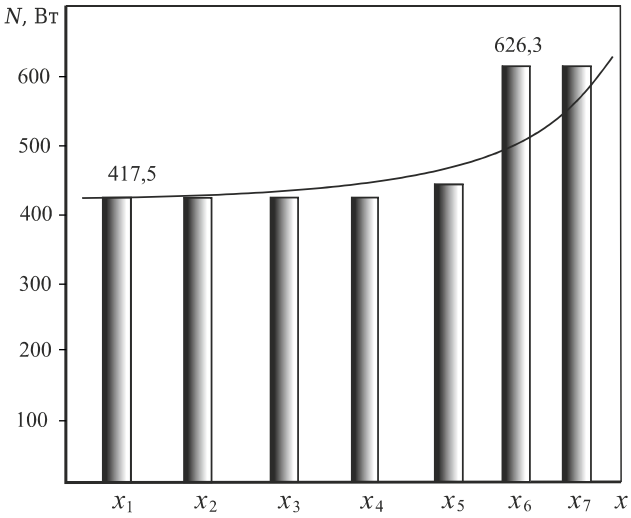

Рис. 6. Распределение мощности тепловых потоков нагревателей по рабочей поверхности в пределах площади рамки ($a \times b$)

вателей на рабочую поверхность подовой платформы на площади, равной $a \times b$, показано на рис. 6 в виде гистограммы. Очевидно, что тепловая энергия не может распределяться дискретно, так как в соответствии с правилом «натянутых нитей» [9] тепловое излучение электрических нагревателей, расположенных, например, в области рамки с координатой x_7, будет достигать всех участков поверхности платформы, правда, с уменьшением мощности потока в зависимости от отдаленности участка. Аналогично распределятся энергии и от других нагревателей.

На рис. 6 показано также примерное распределение мощности падающих эффективных потоков в зависимости от координаты участка. Точное распределение этих мощностей и, соответственно, температур на рабочей поверхности подвижной платформы может дать только аналитическая модель, основанная, например, на методе сальдо-потоков [10], дающем весьма точные результаты [11].

Работа по изучению возможностей энерготехнологических агрегатов новой концепции применительно к обжигу вермикулита и термоактивации других минералов [12] еще в самом начале. Необходимо провести моделирование процесса управления движением сыпучей среды на подовой платформе печи, процессов теплоусвоения и переноса теплового излучения на обрабатываемую среду с учетом ее оптических свойств, установить энергетические соотношения при теплоусвоении вермикулита и иных минералов, а также выполнить целый ряд экспериментальных исследований.

Но сделанный прогноз обнадеживает. К настоящему времени уже разработана техническая документация на опытный образец печи с подвижной подовой платформой и ведется ее изготовление.

* * *

Поддержано грантом ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (заявка С1-11374, приказ № 22-39 от 04. 03.2016).

Библиографический список

1. ***Нижегородов, А. И.*** Пути и пределы повышения энергоэффективности электрических модульно-спусковых печей для обжига вермикулита. Переход к новой концепции / *А. И. Нижегородов* // Новые огнеупоры. — 2016. — № 12. — С. 13–18.

2. ***Бауман, В. А.*** Вибрационные машины и процессы в строительстве / *В. А. Бауман, И. И. Быховский*. — М. : Высш. школа, 1977.

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

4. **Пат. 2351862 РФ, МПК F 27 B 9/00.** Электрическая печь для обжига вермикулитовых концентратов / Нижегородов А. И. ; заявитель и патентообладатель Нижегородов А. И. — № 2007133939 ; заявл. 11.09.07 ; опубл. 10.04.09, Бюл. № 10.

5. ***Нижегородов, А. И.*** Факторы надежности энерготехнологических агрегатов для обжига вермикулита / *А. И. Нижегородов* // Строительные и дорожные машины. — 2015. — № 5. — С. 13–18.

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

7. ***Нижегородов, А. И.*** Эффективность огневых и электрических модульно-спусковых печей для обжига вермикулита / *А. И. Нижегородов* // Технология машиностроения. — 2010. — № 1. — С. 32–34.

8. **Пат. 141915 РФ, МПК F 27 B 15/14.** Электрическая печь для обжига вермикулита / Нижегородов А. И. ; заявитель и патентообладатель Нижегородов А. И. — № 2014106514/02 ; заявл. 20.02.14 ; опубл. 20.06.14, Бюл. № 17.

9. ***Крейт, Ф.*** Основы теплопереноса : пер. с англ. / *Ф. Крейт, У. Блэк*. — М. : Мир, 1983. — 512 с.

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

11. ***Нижегородов, А. И.*** Исследование теплопереноса в электрических модульно-спусковых печах для обжига вермикулита с учетом свойств поглощающей среды / *А. И. Нижегородов* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2014. — № 5. — С. 29–36.

12. ***Кременецкая, И. П.*** Реагент для иммобилизации тяжелых металлов из серпентиносодержащих вскрышных пород / *И. П. Кременецкая, О. П. Корытная, Т. Н. Васильева* [и др.] // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. — 2008. — № 4. — С. 33–40. ■

Получено 28.04.16
© А. И. Нижегородов, 2017 г.