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

ПУТИ И ПРЕДЕЛЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЬНО-СПУСКОВЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ОБЖИГА ВЕРМИКУЛИТА. ПЕРЕХОД К НОВОЙ КОНЦЕПЦИИ

Проведен анализ путей повышения энергоэффективности и надежности электрических модульно-спусковых печей для обжига вермикулита, определены пределы и причины пределов их совершенствования, сформулированы основные положения концепции агрегатов нового поколения — электрических печей с вибрационной подовой платформой.

Ключевые слова: *электрическая модульно-спусковая печь, концентрация вермикулита, «нулевой» неэлектрический модуль, «скрытая» эксергия вермикулита, электрическая печь с вибрационной подовой платформой.*

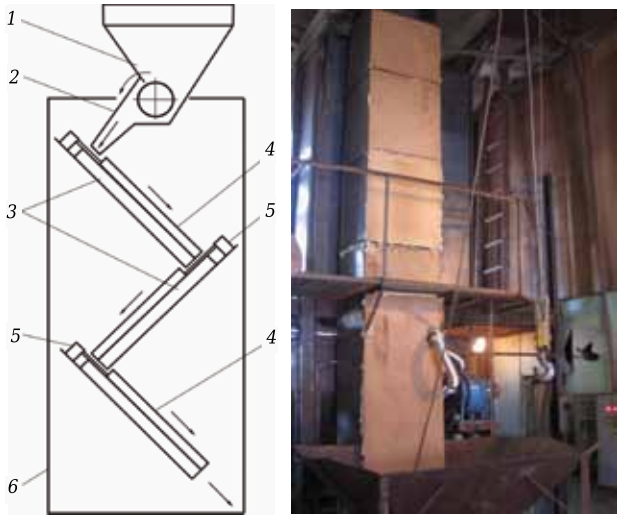
Вспученный вермикулит — востребованный сырьевой ресурс для производства огнеупорных, огнезащитных, тепло- и термоизоляционных материалов [1–3]. Однако получение вспученного вермикулита является энергоемким процессом, хотя с появлением электрических модульно-спусковых печей удельную энергоемкость его обжига удалось существенно снизить [4–6].

Цель работы, основные аспекты которой приводятся в статье, — анализ путей повышения энергоэффективности рассматриваемых электрических печей, определение пределов их совершенствования и формулировка базовых критериев для энерготехнологических агрегатов новой концепции, лишенных прежних недостатков и ограничений.

Первые электрические модульно-спусковые печи для обжига вермикулита были построены в 2003–2008 гг. в г. Иркутске ООО «Квалитет». Печи имели значительные габариты и рабочие огнеупорные поверхности модулей обжига (длина 0,91–0,92 и ширина 0,92–0,126 м) и были слишком велики. Поэтому в нижних частях модулей из-за ускоренного движения вспучивающихся зерен вермикулита резко снижалась их концентрация и потоки мощности теплового излучения с поверхностей электрических нагревателей не столько падали на зерна, сколько рассеивались в плоском и незамкнутом пространстве обжига. Удельная энергоемкость процесса обжига второй опытно-промышленной печи, показанной на рис. 1, составляла в среднем для различных размерных групп вермикулитовых концентратов 250,1 мДж/м^3 [4, 5].

Низкая энергоэффективность печей потребовала структурно-конструктивной трансформации: была создана шестимодульная печь с короткими модулями длиной 0,297 м, что несколько повысило концентрацию материала и снизило среднюю удельную энергоемкость обжига до 235,4 мДж/м^3 [6], всего на 6,2 %. Но важно другое. Указанная трехмодульная печь при средней продолжительности обжига t = 2,84 с и производительности $П_V$ = 1,75 м^3/ч имела размеры модуля в плане: ширину B = 0,96 м и длину его рабочего участка 0,89 м. В пересчете на вспученный материал можно найти суммарный

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



а *б*

Рис. 1. Принципиальная схема трехмодульной печи (*а*) и вторая опытно-промышленная печь (*б*) ООО «Квалитет» (г. Иркутск, 2005 г.)

объем всех зерен, одновременно находящихся на трех модулях печи:

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

где 0,365 — коэффициент пористости массива вспученного вермикулита [4].

Значение V_{Σ} составляет $876600 \cdot 10^{-9}$ м^3, одно вспученное зерно, полученное из концентрата КВК-4 Ковдорского месторождения, при среднем условном диаметре 4 мм имеет объем $33,5 \cdot 10^{-9}$ м^3. Тогда можно найти количество зерен m, одновременно находящихся в печи: m = 876600 / 33,5 = = 26167 шт., на одном модуле будет располагаться 8722 зерна при среднем шаге их расположения δ = 0,0107 м и зазоре между ними 0,0067 м. Концентрация вермикулита в среднем на одном модуле трехмодульной печи $к_{3м}$ = 8722 / (0,96×0,89) = = 10208 шт./м^2.

Шестимодульная печь с параметрами t = = 2,74 с и $П_V$ = 1,28 м^3/ч имела размеры модуля 0,92×0,297 м. Объем вспученного материала здесь равен $618600 \cdot 10^{-9}$ м^3, количество зерен одновременно находящихся в печи, m = 618600 / 33,5 = = 18465 шт., количество зерен на одном модуле 3077 шт.

Концентрация вермикулита в среднем на одном модуле шестимодульной печи $к_{6м}$ = 3077 / / (0,92×0,297) = 11261 шт./м^2.

Возьмем отношение концентраций вермикулита на модулях шестимодульной и трехмодульной печей:

$к_{6м} / к_{3м}$ = 11261 / 10208 = 1,103.

Имеет место увеличение концентрации на 10,3 %, что соответствует снижению средней удельной энергоемкости обжига на 6,2 %. Однако дальнейшее повышение концентрации за счет модульности печи невозможно, так как модуль короче 0,250 м конструктивно не реализуем.

Это главный, неустранимый недостаток электрических модульно-спусковых печей, и обусловлен он тем, что заложено в самом принципе их действия: движение вермикулита происходит под действием силы тяжести, им невозможно управлять и, следовательно, невозможно управлять важнейшим параметром — концентрацией материала $к_м$ на поверхности модуля.

Однако совершенствование печей продолжалось другим способом. Анализ трехмодульной печи показал [4, 6], что на верхнем модуле 1 кВт мощности обеспечивает снижение кажущейся плотности на 10,27 кг/м^3, на втором и третьем — только на 0,79 и 0,198 кг/м^3 соответственно. Очевидно, что процессы теплоусвоения и структурообразования вермикулита наиболее интенсивны на начальном этапе обжига, энергетически эффективным является только верхний модуль, а КПД модулей уменьшаются от верхнего к нижнему. Например, для шестимодульной печи КПД распределяется так [4]:

η_1 = 0,25; η_2 = 0,052; η_3 = 0,234; η_4 = 0,0124; η_5 = 0,034; η_6 = 0,0012.

Вторая структурная трансформация — изменение порядка сопряжения модулей дала более радикальный результат [7, 8]. Изменение конструктивной структуры путем переноса нижнего модуля из цепи последовательных сопряжений в параллельное сопряжение с первым (верхним) модулем [4, 7] существенно изменило показатели энергетической эффективности. Печь с последовательно-параллельным сопряжением модулей, представленная на рис. 2 (ППС-печь), показала существенное снижение удельной энергоемкости обжига до 196,8 мДж/м^3. По сравнению со второй опытно-промышленной печью ее энергоемкость снизилась на 21,3 % [4].

Средняя удельная энергоемкость, мДж/м^3, обжига в печах различной модификации приведена ниже:

Трехмодульная	250,1
Шестимодульная	235,4
Шестимодульная ППС	196,8
Трехмодульная с «нулевым» модулем	173–175

Несмотря на неплохой результат, дальнейшее повышение энергетической эффективности электрических модульно-спусковых печей стало невозможным из-за самого принципа модульности таких энерготехнологических агрегатов. Это второй и тоже непреодолимый недостаток.

Результаты исследований, проведенных в работе [4], показали, что полный КПД даже у ППС-печи составляет всего 0,43, а это значит, что 57 % тепловой энергии, излучаемой электрическими нагревателями, несмотря на эффективную термоизоляцию модулей, теряется безвозвратно в окружающую среду.

Это обстоятельство привело к новому техническому решению [9] — конструкции энергосберегающей печи с добавочным неэлектрифицированным «нулевым» модулем (рис. 3), использующим «скрытую» эксергию вермикулитовых зерен при пониженном потреблении электроэнергии основными модулями.

Эксергия — качественная энергия, способная к преобразованию без существенных потерь, в частности к совершению механической работы [10]. В нашем случае накопленная в вермикулите тепловая энергия вследствие кондуктивного переноса теплоты по пластинкам его зерен переносится внутрь, завершает дегидратацию и механическую работу — структурообразование глубинных слоев вермикулита, так как около 45 % тепловой энергии, накопленной вермикулитом в процессе теплоусвоения, остается во вспученном и нагретом до 730–750 °С материале. Без «нулевого» модуля эта энергия

полностью рассеивалась в окружающую среду после выхода вспученного материала из печи. Если дегидратацию оставить частично не завершенной и перенести ее окончание в «нулевой» модуль, то можно сэкономить электроэнергию, настроив печь на пониженный температурный режим.

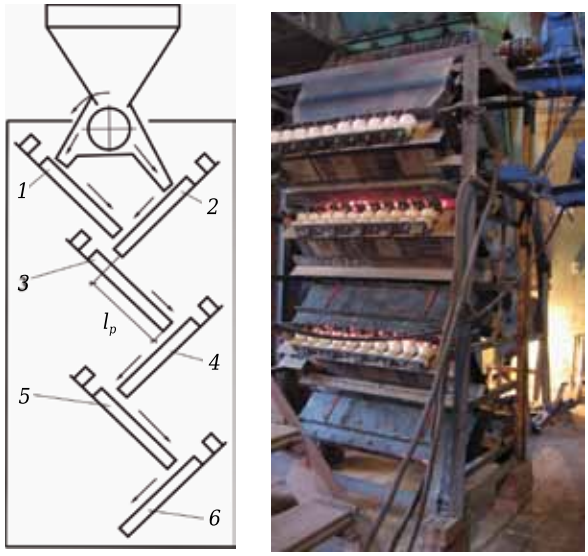
Такая печь показана на рис. 3. Она содержит дозатор *1* с лотком *2*. В ее корпусе *3* размещены электрифицированные модули *4* с рекуператорами энергии *5*, соединенные трубами *6* с «нулевым» модулем *7* через патрубки *8*. Трубопроводы *9* отводят из тепловых камер «нулевого» модуля горячий воздух. Модули *4* установлены на рамах *10*, закрыты крышками *11*, под которыми расположены электрические нагреватели, закрепленные на специальных головках *12*. Перфорированные отверстиями всасыватели *13* вытягивают горячий воздух из торцов модулей *4*. В «нулевом» модуле между верхними и нижними тепловыми камерами расположены полости, заполненные термоизоляционным материалом, а между полостями находится пространство обжига. Камеры не связаны с процессом довспучивания, а лишь минимизируют потери тепла из пространства обжига.

Вермикулитовый концентрат, пересыпаясь по модулям *4*, начинает дегидратироваться под действием лучистой энергии, потоки которой, падающие на сыпучую среду с поверхностей нагревателей и отраженные от оснований и крышек, усваиваются вермикулитовыми зернами внутри их пространств обжига. Однако из-за пониженного температурного режима теплоусвоение и сопутствующие процессы не успевают закончиться до выхода из нижнего модуля *4*. При этом зерна вермикулита, оставаясь частично недовспученными, поступают в плоское пространство обжига «нулевого» модуля, в котором теплоусвоение вермикулита завершается окончательно.

Снаружи «нулевой» модуль дополнительно изолирован термоизоляционным материалом, что практически сводит к нулю теплообмен между зернами вермикулита, находящимися в пространстве обжига «нулевого» модуля, и окружающей средой.

Предварительный анализ модели теплоусвоения вермикулита с учетом «скрытой» эксергии, проведенный в работах [11, 12], показал, что применение «нулевых» модулей может повысить КПД электрических модульно-спусковых печей примерно на 12 % при соответствующем снижении удельной энергоемкости обжига.

ППС-печи с дополнительными неэлектрифицированными модулями могут иметь различные варианты выполнения. Один из них показан на рис. 4. В таких печах наибольшее значение КПД имеют верхние модули (η_1 = 0,25; η_2 = 0,052), поэтому по два электрифицированных модуля соединены последовательно с Г-образным «нулевым» модулем в едином блоке, электрифицированные блоки сопряжены параллельно. После них два параллельных потока вспучивае-



а *б*

Рис. 2. Принципиальная схема шестимодульной печи с последовательно-параллельным сопряжением модулей (*а*) и опытно-промышленная ППС-печь (*б*) ООО «Квалитет» (г. Иркутск, 2009 г.)

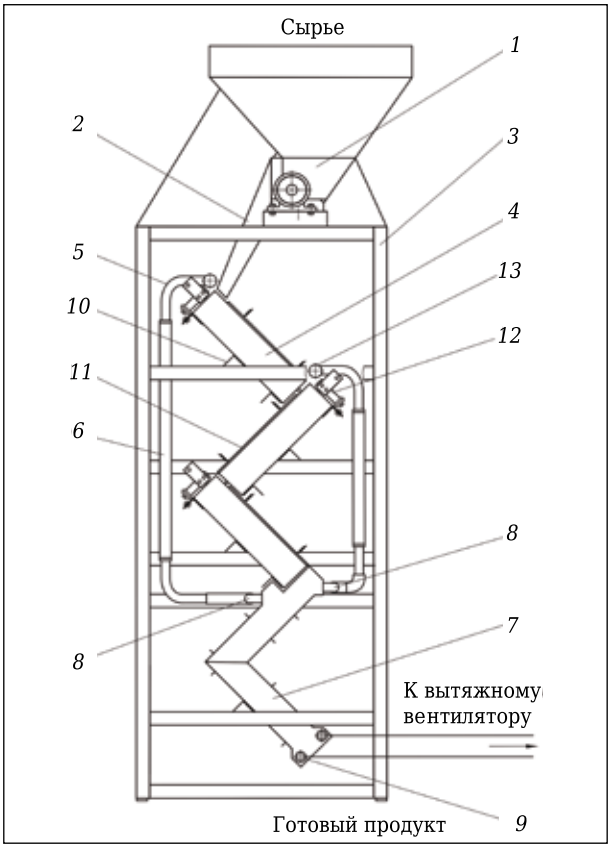


Рис. 3. Схема энергосберегающей электрической модульно-спусковой печи с Г-образным «нулевым» модулем

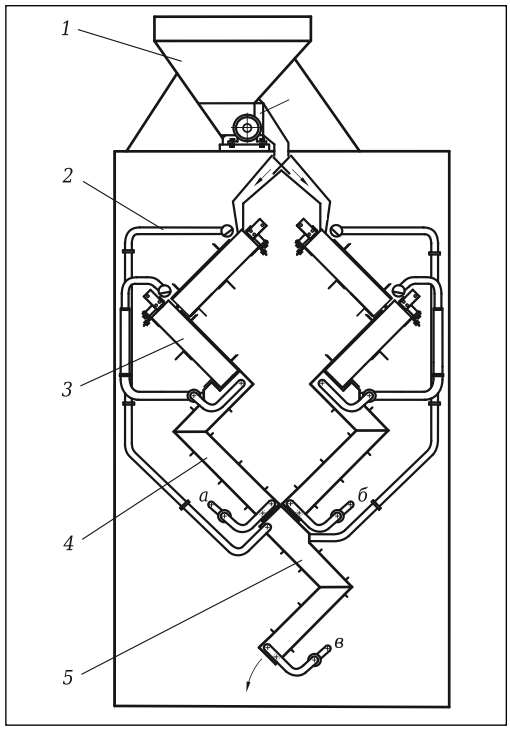


Рис. 4. ППС-печь с «нулевыми» модулями: *1* — дозатор; *2* — рекуператор; *3* — электрический модуль; *4* — «нулевой» модуль; *5* — суммирующий модуль; *а*, *б* и *в* — точки подключения к вытяжному вентилятору

мого вермикулита встречаются в суммирующем неэлектрифицированном модуле, где концентрация материала увеличивается вдвое, обмен тепловой эксергией между зернами интенсифицируется, вермикулит окончательно дегидратируется и вспучивается.

Возможны и другие, более сложные комбинации электрифицированных и «нулевых» модулей, однако все эти технические решения могут увеличить КПД еще на 5–8 %. Но они одновременно приводят к усложнению конструкции. Таким образом, и этот путь, основанный на использовании в дополнительных модулях «скрытой» эксергии вермикулита при сниженном потреблении электроэнергии, дает хороший, но ограниченный эффект: удельная энергоемкость может достигнуть значений 173–175 мДж/м^3 и ниже.

Имеется еще ряд факторов, которые следует рассматривать как недостатки, заложенные в новую некогда концепцию электрических модульно-спусковых печей.

Как механическая система модульно-спусковая печь представляет собой гравитационный спуск для перемещения сыпучих материалов [13]. Особенность таких систем состоит в невозможности управления скоростью движения материала, которая определяется силами тяготения и трения частиц. Применительно к печи это означает, что управление скоростью вермикулитового потока и, следовательно, временем обжига невозможно. Выбор оптимального температурно-временного режима может быть достигнут только установкой температуры нагревательных элементов электрифицированных модулей. Этот фактор накладывает существенные ограничения на управление процессом обжига вермикулитовых концентратов различных размерных групп и видов.

Поверхность обжига электрифицированных модулей разделена на продольные рабочие камеры, образованные электрическими нагревателями в виде нихромовых полос, внутри которых происходит движение вермикулита. Нагреватели установлены на ребро, однако занимают некоторую площадь. Так, у модуля шириной B = 0,96 м и длиной рабочего участка l = 0,89 м площадь поверхности 0,8544 м^2, а суммарная площадь поверхности, занимаемой нагревательными элементами (10 шт.) при их толщине t = 0,002 м с учетом, что нагреватели имеют по две полосы, равна:

$$s = 2 \cdot 0{,}002 \cdot 0{,}89 = 0{,}00356 \text{ м}^2,$$

что составляет 0,42 %. Немного, но это приводит к снижению производительности.

Наличие нагревателей на поверхности модулей создает еще один эксплуатационный недостаток. Большинство вермикулитовых зерен в процессе движения время от времени вступают в контакт с электрическими нагревателями. При этом неизбежно налипание мельчайших частиц различных нетугоплавких минералов, входящих в незначительных количествах в состав природного вермикулита и мелкодисперсного шлама, всегда сопутствующего вермикулитовым концентратам. На поверхности нагревателей, особенно при 740–760 °С и выше, постепенно образуется нагар, который приводит к их локальному перегреву, перегоранию, отказу печи, ее вынужденному простою в ремонте.

На рис. 5 показаны фрагменты поверхности электрифицированного модуля. Из-за налипания сначала шламовых частиц, а затем и частично вспучившихся вермикулитовых зерен (см. рис. 5, *а*) из-за неконтролируемого нагрева нихромовых полос за несколько секунд произошло образование «вермикулитовой пробки» (см. рис. 5, *б*), что привело к локальной термоизоляции нагревателей, их быстрому нагреву до температуры плавления нихрома (~1460 °С) и отказу печного агрегата.

И последний фактор, определяющий еще один существенный недостаток — неравномерное распределение температур по ширине электрифицированных модулей. Экспериментальное исследование температуры поверхностей нагревателей и огнеупорной поверхности внутри продольных камер, образованных ими, показало [4], что в пристеночных зонах модуля обжига существенно «холоднее», чем в центре,

поэтому вермикулит на выходе из печи по краям остается немного недовспученным. Разность насыпной плотности вермикулита, выходящего по краям и в центре нижнего модуля печи, достигает 3–5 %. Для устранения этого недостатка ширину продольных камер в пристеночных зонах приходилось делать несколько меньше, чем в средней зоне, т. е. нагреватели по поверхности модуля распределяли с переменным шагом *r*. При этом необходимо было, чтобы самые узкие камеры удовлетворяли условию:

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

где D — средний условный диаметр частиц исходного вермикулитового концентрата, определяющий его размерную группу [4] (меньшее значение — для крупных фракций, большее — для мелких), при котором в них исключается образование заторов вермикулита.

Итак, концепция электрических модульно-спусковых печей исчерпала возможности эволюции. Однако принцип локализации теплового поля в ограниченном щелевидном пространстве обжига доказал свое преимущество [4]. Если в огневой печи перепад температуры в ее рабочем пространстве ~1200 °С на входе и ~500 °С на выходе, то в электрических модульно-спусковых печах распределение температур по длине рабочих камер практически однородно. В огневых печах тепловое поле создается не непосредственно в сырьевой среде, а в большом пространстве, куда помещается эта среда. В электрической печи локализованное тепловое поле реализуется непосредственно в вермикулитовом потоке.

На принципе локализации базируется новая концепция электрической печи с подвижной подовой платформой, устраняющая недостатки модульно-спусковых печей и обеспечивающая:

– устранение фактора модульности, ограничивающего повышение энергетической эффективности;

– однородную и высокую концентрацию вспучиваемого вермикулита на поверхности подовой платформы;

– постоянство средней скорости движения вермикулита в тепловом поле и возможность настройки печи на время обжига;

– возможность регулирования скорости движения вермикулита;

– исключение контакта вермикулита с электрическими нагревателями;

– равномерное распределение температур по ширине подовой платформы;

– простоту конструкции.

На рис. 6 представлена схема, поясняющая работу электрической печи новой концепции. Подовая платформа является подвижным основанием для размещения вермикулита. С помощью управляемого вибрационного механизма (на рис. 6 не показан) создаются однонаправленные несимметричные колебания платформы, чем обеспечивается перемещение вермикулитовых зерен в одном направлении без возвратных движений. Этому способствует возможный небольшой наклон платформы в сторону движения вермикулита. Концентрат подается барабанным дозатором так, чтобы во вспученном состоянии

Рис. 5. Налипание частиц вермикулита на электрические нагреватели (*а*) и последствия образования «вермикулитовой пробки» (*б*) при перегреве нихрома (T ~880 °С)

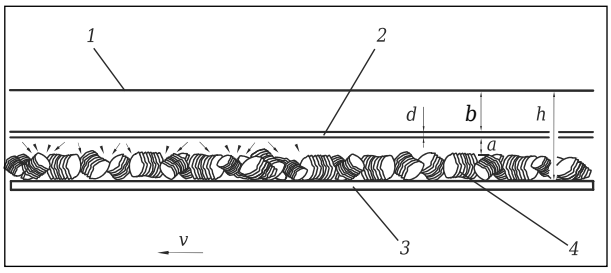


Рис. 6. Принцип действия печи: *1* — внутренняя поверхность крышки; *2* — электрические нагреватели; *3* — основание подвижного пода; *4* — вспучиваемый вермикулит

интервалы между зернами были близки к нулю, а их концентрация максимальна.

Движение материала происходит под натянутыми электрическими проволочными нагревателями диаметром *d*, расположенными над вермикулитом на минимальном расстоянии *a* с зазором *b* относительно термокрышки. Общий размер щелевидного пространства обжига *h*, как и параметры *a* и *b*, может регулироваться при переходе от одного вида и размера сырья к другому.

Зерна вермикулита, если они располагаются на платформе со средним шагом $\delta = D$ и нулевым зазором, т. е. условно вспученные, образуют сплошное покрытие основания. Непокрытыми остаются межзеренные пустоты, занимающие 25–40 % общей площади в зависимости от гранулометрического состава и структуры взаиморасположения зерен: шахматная или порядная регулярная структура. Поэтому до 60 % энергии эффективных (с учетом отраженных) потоков теплового излучения поглощается вермикулитом (см. рис. 6). Отраженные от основания платформы потоки лучистой энергии, хотя и менее мощные, но исходящие от близлежащей к вермикулиту поверхности, также поглощаются его зернами. В этом состоит еще одно достоинство пространства обжига печи новой концепции, поскольку основание плаформы и внутренняя поверхность термокрышки, выполненные из жаростойкой отполированной стали, обладают высокой отражательной способностью. В печах не используется огнеупорный кирпич и муллитокремнеземистый войлок.

Итак, анализ недостатков электрических модульно-спусковых печей и определение пределов их совершенствования позволили разработать альтернативную концепцию энерготехнологических агрегатов для обжига вермикулита — электрических печей с подвижной подовой платформой и управляемым температурно-временны́м режимом обжига вермикулитовых концентратов.

* * *

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

2. ***Арутюнов, В. В.*** Конъюнктура минерального сырья. Вермикулит / *В. В. Арутюнов, Б. М. Чайков*. — М. : ВИЭМС, 1992. — 112 с.

3. НПП «Укрвермикулит» [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://www.vermiculite.com.ua (31.10.2013).

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

5. ***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. 36–44.

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

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

7. **Пат. 85993 РФ, МПК F 27 B 15/00.** Печь для обжига вермикулита (варианты) / Нижегородов А. И. ; заявитель и патентообладатель А. И. Нижегородов. — № 2009114125 ; заявл. 14.04.09 ; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23.

8. ***Нижегородов, А. И.*** Развитие концепции модульно-спусковых электрических печей для обжига вермикулитовых концентратов / *А. И. Нижегородов* // Строительные и дорожные машины. — 2009. — № 10. — С. 24–27.

9. **Пат. 154263 РФ, МПК F 27 B 9/06.** Электрическая печь для обжига вермикулитовых концентратов / Нижегородов А. И., Звездин А. В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИРНИТУ, г. Иркутск. — № 2015112982/02 ; заявл. 08.04.2015 ; опубл. 20.08.2015, Бюл. № 23.

10. ***Эткин В. А.*** Эксергия и анергия [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://www.ntpo.com/physics/studies/25/3.shtml.

11. ***Нижегородов, А. И.*** Анализ возможности повышения к. п. д. энергосберегающих печей для обжига вермикулитовых концентратов, использующих «скрытую» эксергию вспучиваемого материала / *А. И. Нижегородов* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2015. — № 9. — С. 45–50.

12. ***Nizhegorodov, A. I.*** Using and assessing energy efficiency of electrical ovens with unit-type releasing intended for thermal energization of sungulite-vermiculite conglomerates / *A. I. Nizhegorodov* // IOP Conf. Series: materials science and engineering. — 2016. — Vol. 110, article number 012014. DOI 10.1088/1757-899X/110/1/012014

13. ***Вайнсон, А. А.*** Подъемно-транспортные машины / *А. А. Вайнсон* : 3-е изд. — М. : Машиностроение, 1974. — 431 с. ■

Получено 28.04.16
© А. И. Нижегородов, 2016 г.