

УДК 66.041.3-65:691

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ С ПОДВИЖНЫМ ПОДОМ ПРИ ОБЖИГЕ ВЕРМИКУЛИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ РАЗЛИЧНЫХ РАЗМЕРНЫХ ГРУПП

Рассмотрены вопросы установления взаимосвязи удельной энергоемкости обжига вермикулита с размерностью его сырьевых концентратов и выявления рациональных режимов работы электрических печей с вибрационными подовыми платформами. Проведены анализ температурно-временных зависимостей, расчет производительности и тепловой мощности при обжиге вермикулитовых концентратов разных размерных групп. На основе эмпирических данных впервые делается вывод о том, что удельная энергоемкость не зависит от размерных групп одного и того же концентрата. Показано, что при настройке печи на пониженный температурный режим, не меняющий качества вспученного продукта, достигается дополнительная 40 %-ная экономия энергии, приводящая к минимально возможной удельной энергоемкости обжига (46–48 мДж/м³).

Ключевые слова: вермикулит, концентрат, удельная энергоемкость, тепловая мощность, производительность, электрическая печь с вибрационной подовой платформой, физическая модель печи.

ВВЕДЕНИЕ

Вермикулит — ценный многоплановый продукт, на основе которого производят более ста наименований различных изделий и материалов. Обжиг вермикулита, обеспечивающий его вспучивание, — энергоемкий процесс, поэтому электрические печи, предназначенные для этой цели, постоянно совершенствуются.

Модульно-спусковые электрические печи для термообработки вермикулитового сырья и других сыпучих материалов [1–3] из-за большой стоимости электроэнергии во многих регионах страны до недавнего времени не могли конкурировать с пламенными печами, несмотря на низкую энергоемкость процесса: 150–160 против 235–260 мДж/м³ [4]. Новые печи с подвижной (вибрационной) подовой платформой [5] способны принципиально изменить эту ситуацию, так как аналитические расчеты [6, 7] и экспериментальные результаты [8] показывают возможность достижения удельной энергоемкости 45–65 мДж/м³ на концентратах Ковдорского месторождения. Это доказано.

Но ранее анализ зависимостей энергоемкости обжига вермикулита от размерных групп его концентратов как в модульно-спусковых печах, так и в печах с подвижным подом не проводился.

Цель работы состоит в установлении взаимосвязи удельной энергоемкости обжига верми-

кулита с размерностью сырьевых концентратов и выявлении рациональных режимов работы новых печей с учетом их производительности.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПЕЧИ

Часовая объемная производительность Π_v , м³/ч, трехмодульной печи определяется по формуле

$$\Pi_v = V \cdot 3600 / t,$$

где V — объем массива вспученных зерен, занимающих поверхность подовой плиты платформы, м³; t — среднее время движения зерна по поверхности подовой платформы (для пятой размерной группы концентрата Medium Кокшаровского месторождения [9]).

Этот же объем V , м³, может быть выражен как суммарный объем тех же зерен по их условным диаметрам с учетом коэффициента пористости массива k , равного для вспученного вермикулита $\sim 0,365$ [10]:

$$V = V_{\Sigma 0} / (1 - k), \quad (1)$$

где $V_{\Sigma 0}$ — суммарный объем зерен по их условным диаметрам.

Количество вспученных зерен на трех подовых плитах платформы n со средневзвешенным условным диаметром $D = 0,0047$ м [7] (вермикулитовый концентрат Medium) при ширине пода $B = 0,9$ м и длине $L = 0,4$ м (с учетом участка ссыпания сырья из дозатора ее рабочая часть $L_p = 0,37$ м) и при условии порядовой структуры расположения зерен определится формулой $n = 3(B/D) \cdot (L/D) = 3(B \cdot L / D^2)$.

С учетом формулы объема шара выражение для расчета производительности Π_v , м³/ч, трех-



Т. Б. Брянских
E-mail: broocha@yandex.ru

модульной печи с подвижной подовой платформой получит следующий вид:

$$P_V = a \cdot \frac{0,1667\pi D^3 \cdot 3600 \cdot n}{t(1-k)} = a \cdot \frac{3 \cdot 0,1667\pi DLB \cdot 3600}{t(1-k)}, \quad (2)$$

где a — коэффициент, учитывающий долю материала (вермикулита), способного к полноценному вспучиванию при обжиге без учета инертного материала, который, согласно данным [9], в концентрате Medium содержится в объеме 10 % (тогда $a = 0,9$).

В экспериментах, проведенных на физической модели печи — однофазном одиночном модуле, показанном на рис. 1, использовали концентрат Medium пятой размерной группы со средневзвешенным условным диаметром $D = 4,7$ мм. Для него время t движения зерна по вибрирующей подовой платформе составило 3,31 с. Время определяли путем вбрасывания меток в общий поток вспучивающегося вермикулита как среднее арифметическое по пяти измерениям.

Экспериментальное значение производительности модуля составило 1,186 м³/ч, что в пересчете на трехмодульную печь дает значение 3,56 м³/ч.

Производительность трехмодульной печи, определенная по формуле (2), для этой размерной группы получилась равной 3,78 м³/ч. Если за базовое принять значение 3,56 м³/ч, то расчетная производительность (уравнение (2)) дает результат, завышенный на 6,2 %.



Рис. 1. Физическая модель: 1 — термокрышка; 2 — панель; 3 — крепления; 4 — пружины; 5 — рама; 6 — кабель

Введем поправочный коэффициент k_0 , определенный отношением 3,56/3,78. Тогда формула производительности P_V , м³/ч, примет окончательный вид:

$$P_V = a \cdot \frac{3 \cdot 0,1667\pi DLB \cdot 3600}{t(1-k)} \cdot k_0. \quad (3)$$

Тепловая мощность печи и энергоемкость обжига

Тепловую мощность N_T можно определить исходя из уравнения Стефана – Больцмана [11]:

$$N_T = \sigma T_n^4 f_n, \quad (4)$$

где σ — постоянная Стефана – Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) [11]; T_n^4 — абсолютная температура нагревательных элементов модуля, К; f_n — полная площадь всех излучающих поверхностей нагревателей одного модуля, для физической модели $f_n = 0,282$ м².

С учетом того, что печь создает активную электрическую нагрузку на сеть, потерями энергии можно пренебречь, и тогда потребляемая электрическая мощность будет равна

$$IU = N_T = \sigma T_n^4 f_n,$$

где I — сила тока; U — напряжение.

При этом удельную энергоемкость обжига e_y , Дж/м³, можно рассчитывать через температуру нагревателей:

$$e_y = \frac{3\sigma T_n^4 f_n \cdot 3600}{P_V}. \quad (5)$$

Но прежде нужно получить температурно-временные зависимости, отражающие возможные режимы обжига вермикулита различных размерных групп.

Мощность потока лучистой энергии, падающей на вермикулитовый монослой, движущийся по подовой платформе, поглощаемая им энергия Q_n , Вт, и удельная энергия теплопроизводства θ_Σ , Дж/кг, связаны через массовую производительность печи P_G , кг/с, соотношением

$$\theta_\Sigma P_G = Q_n, \quad (6)$$

где Q_n определяется выражением, полученным в работе [12]. С учетом того, что в новой конструкции печи нагреватели приподняты над подовой плитой, выражение поглощаемой мощности примет вид:

$$Q_n = \alpha_b I U \varepsilon_n \left\{ 2\varphi_{н.в} + \varphi_{к.в} \left[2 \frac{\varphi_{14} + \varphi_{34} \rho_4}{1 - \rho_4 \rho_4 \varphi_{34}^2} + (2\varphi_{ак} + 2\varphi_{вк} + 2\varphi_{ск}) \right] \right\}, \quad (7)$$

где α_b — поглощательная способность однослойного вермикулитового потока [13], $\alpha_b = 0,768$; I и U — действующие значения силы тока, А, и напряжения, В, в электрической цепи нагревателей; ε_n — степень черноты нихромовых нагревателей печи, $\varepsilon_n = 0,96$; $\varphi_{н.в}$ и $\varphi_{к.в}$ — угловые коэффициенты потоков от нагревателей на вермикулит ($\varphi_{н.в} = \varphi_{13} = 0,43$) и от крышки на вермикулит ($\varphi_{к.в} = \varphi_{43} = \varphi_{34} = 0,333$); φ_{14} , φ_{34} и φ_{13} — угловые коэффициенты, определяющие оптико-геометрические характеристики условных рабочих камер модулей обжига, $\varphi_{14} = 0,116$, $\varphi_{34} = 0,333$ и $\varphi_{13} = 0,43$; ρ_b — отражательная способность однослойного вермикулитового потока, $\rho_b = 0,232$; ρ_4 — отражательная способность термоизоляционного покрытия крышки из мулитокремнеземистого войлока, $\rho_4 = 0,65$; $\varphi_{ак}$, $\varphi_{вк}$ и $\varphi_{ск}$ — средние угловые коэффициенты потоков от нагревателей соседних камер модуля обжига

[12] (условная рабочая камера — это пространство, заключенное между соседними полосами нагревательных элементов), $\varphi_{Ак} = 0,128$, $\varphi_{Вк} = 0,078$, $\varphi_{Ск} = 0,04$.

Определим массовую производительность, кг/с:

$$П_G = m / t,$$

где m — масса вермикулитового концентрата, находящегося на трех подовых плитах, кг.

Так как масса дегидратирующего вермикулита снижается из-за выхода химически связанной и межслоевой воды на 20–24 % [10], в левую часть уравнения (7) следует ввести поправочный коэффициент 0,78. Тогда $0,78m$ — это масса движущегося однослойного потока в пересчете на вспученный материал, и она может быть определена через суммарный объем зерен, одновременно находящихся на трех подах печи по формуле (1).

Истинная плотность ρ , кг/м³, вспученного вермикулитового зерна:

$$\rho = \rho_n / (1 - k), \quad (8)$$

где ρ_n — насыпная плотность вермикулита, кг/м³.

При насыпной плотности вспученного вермикулита из концентрата Medium $\rho_n \approx 90$ кг/м³ (получено экспериментально) расчетом по формуле (8) определится значение истинной плотности $\rho = 141,7$ кг/м³.

Выражение, определяющее массу m_b однослойного вермикулитового потока на трех подовых плитах печи, будет иметь вид

$$m_b = 0,78 \cdot 0,1667\pi D^3 \cdot n\rho = 0,249 \text{ кг}. \quad (9)$$

Уравнение (7) с учетом равенства (4) можно привести к виду

$$\theta_{\Sigma} \frac{m_b}{t} = \alpha_b \sigma T^4 \epsilon_n f \left\{ 2\varphi_{Нв} + \varphi_{Кв} \left[2 \frac{\varphi_{14} + \varphi_{34} \varphi_{13} \rho_4}{1 - \rho_b \rho_4 \varphi_{34}^2} + (2\varphi_{Ак} + 2\varphi_{Вк} + 2\varphi_{Ск}) \right] \right\}, \quad (10)$$

а из него получить температурно-временную зависимость, определяющую режим работы печи с вибрационной подовой платформой

$$T = \sqrt[4]{\frac{\theta_{\Sigma} m_b}{t \cdot \alpha_b \sigma \epsilon_n f \left\{ 2\varphi_{Нв} + \varphi_{Кв} \left[2 \frac{\varphi_{14} + \varphi_{34} \varphi_{13} \rho_4}{1 - \rho_b \rho_4 \varphi_{34}^2} + (2\varphi_{Ак} + 2\varphi_{Вк} + 2\varphi_{Ск}) \right] \right\}}}. \quad (11)$$

Удельная энергия теплоусвоения θ_{Σ} для Кокшаровского вермикулита 921,8 кДж/кг установлена в последних экспериментах на физической модели и показана в работах [1, 7].

Приведенное значение соответствует чистому вермикулитовому концентрату, поэтому следует учесть, что в концентрате Medium присутствует примерно 10 мас. % инертного материала, который тоже «потребляет» энергию

$$\theta_n = 0,1 c_n m \Delta T = 0,1 \cdot 942,5 \cdot (512 - 100) = 38,8 \text{ кДж/кг},$$

где 0,1 — массовая доля инертного материала в 1 кг концентрата; c_n — удельная теплоемкость

инертного материала, для песка в диапазоне температур 20÷600 °С c_n в среднем равна 942,5 Дж/(кг·°С) [14]; m — масса исходного концентрата, $m = 1$ кг; ΔT — изменение температуры при нагреве.

Тогда уравнение (11) примет окончательный вид:

$$T = \sqrt[4]{\frac{[0,9 \cdot (\theta_n + \theta_c + \theta_b + \theta_{ar}) + \theta_n] \cdot m_b}{t \cdot \alpha_b \sigma \epsilon_n f \left\{ 2\varphi_{Нв} + \varphi_{Кв} \left[2 \frac{\varphi_{14} + \varphi_{34} \varphi_{13} \rho_4}{1 - \rho_b \rho_4 \varphi_{34}^2} + (2\varphi_{Ак} + 2\varphi_{Вк} + 2\varphi_{Ск}) \right] \right\}}}. \quad (12)$$

Теперь можно получить температурно-временные зависимости.

Если принять время обжига t , соответствующее экспериментальному значению 3,31 с, по формуле (12) получим температуру на нагревателях 1151 К, или 878 °С. Расчет по кельвинам по сравнению с экспериментально полученной температурой 926 °С = 1199 К дает 4,1 % расхождения. Такая точность конечной формулы (12) не может не удовлетворять, так как этим незначительным расхождением можно пренебречь.

Зададим несколько значений времени обжига t и построим по выражению (12) температурно-временную зависимость для концентрата Medium пятой размерной группы (рис. 2, кривая $D_y = 4,7$ мм). Рабочая точка a соответствует температурно-временному режиму, близкому к установившемуся тепловому режиму печи, достигнутому в эксперименте [15] при средней плотности вспученного вермикулита 90–92 кг/м³. Точка b ограничивает верхний порог температур ~ 940 °С, за которым происходит налипание мелкодисперсных частиц на поверхности нагревателей. Другие графики, соответствующие различным условным диаметрам D_y , также построены по уравнению (12).

По формулам (3)–(5) рассчитаем объемную производительность, тепловую мощность трехмодульной печи и удельную энергоемкость обжига вермикулитовых концентратов различных

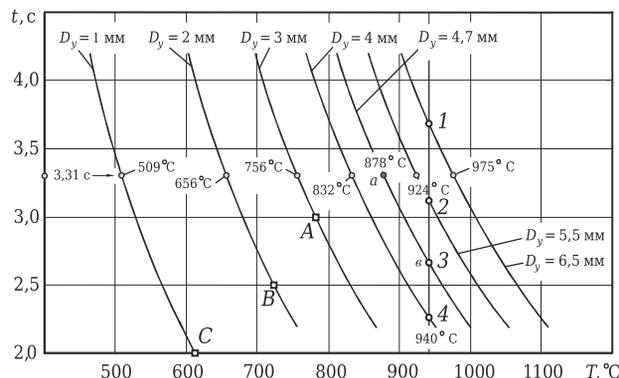


Рис. 2. Температурно-временная зависимость для различных размеров средних условных диаметров вспученных зерен из концентрата Medium; t , с, в точках: 1 — 3,68; 2 — 3,12; 3 — 2,67; 4 — 2,26

размерных групп при времени обжига 3,31 с. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Полученные данные показывают, что с ростом производительности, обусловленным увеличением размерности вспученных зерен, возрастет тепловая мощность, которая обеспечивает полноценное вспучивание материала. Вместе с тем удельная энергоёмкость не проявляет тенденции к изменению при обжиге концентратов различных размерных групп. Но это исследование проведено для одинакового для всех концентратов времени обжига 3,31 с.

Определение рациональных режимов работы

Вторая задача исследования состоит в отыскании и обосновании рациональных режимов работы электрических печей с подвижными подовыми платформами на концентратах различных размерных групп.

Обратимся к рис. 2. Точка *b* на кривой $D_y = 4,7$ мм устанавливает границу предельных температур (~ 940 °С), за которой находится область повышенной вероятности образования нагара на поверхности нихрома, его локального перегрева, перегорания и отказа печного агрегата. Поэтому для размерных групп концентратов в диапазоне от 4 до 6,5 мм температурно-временной режим будет определяться в рабочих точках 1–4.

Рассчитаем по формулам (3)–(5) производительность, тепловую мощность печи и удельную энергоёмкость обжига для этих размерных групп концентратов, учитывая время движения вермикулита по подовым плитам в точках 1–4 (см. рис. 2). В табл. 2 приведены результаты расчетов.

То, что тепловая мощность излучения не меняется, обусловлено одинаковыми температурами на поверхности электрических нагревателей: $T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = 940$ °С. При этом производительность не изменяется, так как определяется двумя факторами: с одной стороны, она снижа-

ется с уменьшением размерности от $D_y = 6,5$ до $D_y = 4,7$ мм, с другой стороны — возрастает за счет уменьшения времени движения вермикулита по подовым плитам от 3,68 до 2,26 с.

Время движения t_i и условный диаметр D_{yi} изменяются синхронно, оставляя отношение D_{yi} / t_i одинаковым. Поэтому удельная энергоёмкость процесса на этих температурно-временных режимах сохраняется неизменной.

Если для концентратов с размерностями D_y от 4,0 до 6,5 мм был критерий, ограничивающий процесс термообработки по температуре, то для концентратов с условным диаметром от 1 до 3 мм выбор температурно-временных режимов будем осуществлять исходя из необходимости поддержания максимально высокой производительности печи. Назначим, например, три точки, которые на рис. 2 обозначены квадратами *A*, *B* и *C* с температурами 888, 995 и 1053 К соответственно.

Рассчитаем по формулам (3)–(5) производительность, тепловую мощность и удельную энергоёмкость для этих размерных групп концентратов, учитывая время движения вермикулита по подовым плитам в точках *A*, *B* и *C*: $t_A = 3,0$ с, $t_B = 2,5$ с, $t_C = 2,0$ с. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Здесь тепловая мощность увеличивается, так как температура растет от точки *C* к точке *A*. Вместе с тем, хотя время обжига при этом становится меньше, производительность все же возрастает из-за увеличения крупности зерен вспученного вермикулита.

Расчет удельной энергоёмкости по формуле (5) показывает, что в указанных точках она остается неизменной. Более того, если мы выберем любые другие точки на температурно-временных кривых (см. рис. 2), то получим такой же результат: энергоёмкость изменяться не будет. Это закономерность, вытекающая из баланса мощности потока лучистой энергии с произведением массовой производительности на удельную энергию теплоусвоения (формула (6)).

Таким образом, цель, поставленная в начале исследования, — установление взаимосвязи удельной энергоёмкости обжига вермикулита и размерности сырьевых концентратов достигнута: установлено, что удельная энергоёмкость не зависит от размерных групп одного и того же концентрата.

Таблица 1. Результаты расчетов производительности, тепловой мощности и удельной энергоёмкости

Показатели	Условный диаметр D_y , размерной группы, мм						
	1	2	3	4	4,7	5,5	6,5
P_V , м ³ /ч	0,81	1,62	2,43	3,24	3,78	4,56	5,265
N_T , Вт	17938	35728	53362	71516	84189	98476	116362
e_y , мДж/м ³	79,61	79,41	79,06	79,45	80,17	77,80	79,56

Таблица 2. Производительность, тепловая мощность и энергоёмкость для концентратов с условным диаметром 4–6,5 мм

Показатели	Условный диаметр, мм			
	4,0	4,7	5,5	6,5
P_V , м ³ /ч	4,71	4,69	4,69	4,70
N_T , Вт	103848	103848	103848	103848
e_y , мДж/м ³	79,31	79,70	79,70	79,52

Таблица 3. Производительность, тепловая мощность и энергоёмкость для концентратов с условным диаметром 1, 2 и 3 мм

Показатели	Условный диаметр, мм		
	1	2	3
P_V , м ³ /ч	1,33	2,13	2,7
N_T , Вт	29826	46016	58975
e_y , мДж/м ³	80,64	77,76	78,62

В процессе экспериментов на физической модели для выяснения влияния насыпной плотности вспучиваемого материала на производительность печи были проведены опыты по измерению производительности, плотности и температуры вермикулита Medium. Пробы вермикулита отбирали каждые 80–90 с, в каждом случае определяли три значения температуры вермикулита, два значения плотности, затем рассчитывали производительность.

На рис. 3 показана зависимость объемной производительности P_V от плотности вспученного вермикулита в интервале 92–126 кг/м³ при значительном изменении температуры — от 452 °C и ниже. Производительность снижается всего на 0,03 м³/ч, т. е. остается практически постоянной.

Возьмем отношение мощностей температурного излучения вермикулита N_1/N_2 при плотности 92 кг/м³ и, например, при 100 кг/м³, так как на этом участке изменения плотности вообще не происходит. При указанных температурах, выраженных в кельвинах (725 и 665 K), согласно закону Стефана – Больцмана отношение будет равно [11]:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{T_{92}^4}{T_{100}^4} = \frac{725^4}{665^4} = 1,41. \quad (13)$$

Отношение (13) показывает, что тратить 41 % тепловой энергии на то, чтобы поддерживать плотность вермикулита вблизи минимального предела 90 кг/м³, регламентированного производителем, нецелесообразно с энергетической точки зрения, ведь разница в плотностях составляет всего 8 кг/м³. Поэтому настройку печи на температурный режим следует производить так, чтобы минимально возможная плотность не достигалась. График на рис. 3 убедительно показывает, что колебания плотности вблизи минимально возможного значения не сказываются на производимом объеме материала.

Если средняя расчетная удельная энергоемкость обжига вермикулита, по данным табл. 1–3, имеет значение около 80 мДж/м³, то с учетом этой экономии для концентрата Medium может быть достигнута значительно меньшая величина (46–48 мДж/м³), а для ковдорских концентратов итога меньше — около 30 мДж/м³.

Еще одним способом дополнительной экономии энергии может служить горизонтальная установка подовых платформ. В настоящее время угол наклона у физической модели печи составляет около 19° к горизонту, но и при таком наклоне из-за разности температур и плотностей воздуха в пространстве обжига модуля формируется сильная воздушная тяга, охлаждающая нагревательные элементы. Эксцентриковый привод не способен реализовать управляемые по частоте и амплитуде ярко выраженные

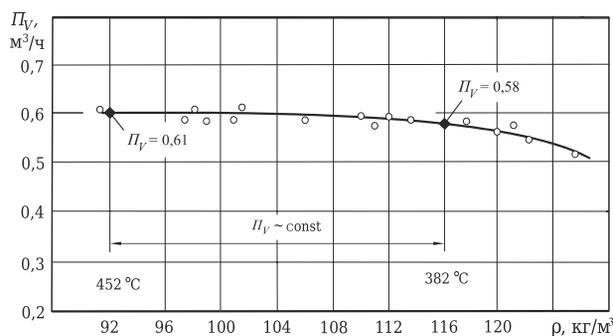


Рис. 3. Зависимость производительности физической модели печи от конечной насыпной плотности вспученного вермикулита: $U = 168,6$ В; $I = 84,7$ А

несимметричные колебания, обеспечивающие односторонний вибротранспортный эффект. Для реализации такого режима могут быть использованы гидрообъемные вибровозбудители, описанные в работах [16, 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований доказана высокая энергоэффективность электрических печей с подвижными подовыми платформами, предназначенными для обжига вермикулитовых концентратов различных размеров групп.

Установлено, что с ростом производительности, обусловленным увеличением размерности вспученных зерен, возрастает тепловая мощность нагревателей (и потребляемая электрическая), которая обеспечивает полноценное вспучивание материала. Вместе с тем удельная энергоемкость обжига вермикулита не проявляет тенденции к изменению при переработке концентратов любых размерностей. Этот результат закономерен и получен впервые.

Решена задача определения рациональных температурно-временных режимов работы электрических печей с подвижными подовыми платформами.

Еще один новый результат заключается в том, что при настройке печи на немного заниженный температурный режим, приводящий к мало-значительному снижению насыпной плотности вспученного продукта, достигается дополнительное 40 %-ное снижение удельной энергоемкости обжига. Минимально возможное значение удельной энергоемкости обжига, достигнутое на физической модели печи, 46–48 мДж/м³ показывает, что электрические печи с подвижными подовыми платформами будут конкурентоспособными на рынке оборудования для производства вермикулита и вермикулитовых продуктов.

На этом работы по усовершенствованию печи новой концепции не завершены. Ведется модернизация однофазного одиночного моду-

ля. В этой конструкции будет предусмотрено размещение нагревателей под подовой плитой, установлена нелинейная «гидравлическая» пружина гидрообъемного возбудителя колебаний подовой платформы.

Поддержано грантом ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере». Заявка С1-11374, приказ № 22-39 от 04. 03.2016. Договор № 1243 ГС 1 / 21693.

Библиографический список

1. **Нижегородов, А. И.** Энерготехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов / А. И. Нижегородов, А. В. Звездин. — Иркутск : Изд-во ИРНТУ, 2015. — 250 с.
2. **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. Ser.: mater. sci. and eng. — Vol. 110 (2016). — article number 012014. doi: 10.1088/1757-899X/110/1/012014.
3. **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. doi: 10.1007/s11148-015-9848-7.
4. **Ахтямов, Я. А.** Обжиг вермикулита / Я. А. Ахтямов, В. С. Бобров [и др.]. — М. : Стройиздат, 1973. — 54 с.
5. **Пат. 166554 РФ. МПК F 27 В 9/06.** Электрическая печь с вибрационной подовой платформой / Нижегородов А. И. ; заявитель и патентообладатель ИрНИТУ, г. Иркутск. — № 2015155496/02, заявл. 23.12.2015, опублик. 27.11.2016, Бюл. № 33.
6. **Нижегородов, А. И.** К исследованию аналитических моделей систем для подачи сыпучих материалов в печь с вибрационной подовой платформой / А. И. Нижегородов // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2015. — № 12. — С. 223–229.
7. **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.
Nizhegorodov, A. I. Transformation of vermiculite energy into mechanical transformation energy during firing in electric furnaces with «zero» module / A. I. Nizhegorodov, A. V. Zvezdin // Refractories and industrial ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 239–245. doi: 10.1007/s11148-016-9960-3.
8. **Нижегородов, А. И.** Исследование физической модели электрической печи для обжига вермикулита с «нулевым» модулем / А. И. Нижегородов, А. В. Звездин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 6. — С. 13–18.
Nizhegorodov, A. I. Study of an electric furnace physical model for firing vermiculite with a «zero» module / A. I. Nizhegorodov, A. V. Zvezdin // Refractories and industrial ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 246–251. doi: 10.1007/s11148-016-9961-2.
9. Приморский вермикулит. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.prim-ver.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=4&lang=ru (11.01.2010).
10. **Нижегородов, А. И.** Электрические модульно-спусковые печи с системой рекуперации энергии для обжига вермикулитовых концентратов / А. И. Нижегородов // Новые огнеупоры. — 2015. — № 10. — С. 22–27.
Nizhegorodov, A. I. Electric modular-trigger kiln with an energy recuperation system for firing vermiculite concentrates / A. I. Nizhegorodov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 56, № 5. — P. 470–475. doi: 10.1007/s11148-016-9871-3.
11. **Кошкин, Н. И.** Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич ; под ред. Д. И. Сахарова. — М. : Физматгиз, 1960. — 208 с.
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. **Звездин, А. В.** К расчету спусковых печей с механическим «нулевым» модулем с учетом модели поглощательно-отражательных свойств перерабатываемого материала / А. В. Звездин // Вестник ИрГТУ. — 2016. — № 12. — С. 34–37.
14. Расчет нагревательных и термических печей : справочное издание / под ред. В. М. Тымчака и В. Л. Гусовского. — М. : Металлургия, 1983. — 480 с.
15. **Брянских, Т. Б.** Исследование энергоэффективности электрической печи с вибрационной подовой платформой для термообработки минерального сырья / Т. Б. Брянских // Вестник ИрГТУ. — 2016. — № 12. — С. 10–19.
16. **Nizhegorodov, A. I.** Hydrostatic vibratory drive of the test stand for excitation of the amplitude-modulated vibrations / A. I. Nizhegorodov, A. N. Gavrilin, B. B. Moyzes // J. Phys.: Conf. Ser. — Vol. 671 (2016). — article number 012037. doi: 10.1088/1742-6596/671/1/012037.
17. **Nizhegorodov, A. I.** Hydraulic power of vibration test stand with vibration generator based on switching device / A. I. Nizhegorodov, A. N. Gavrilin, B. B. Moyzes // Key Eng. Mat. — 2015. — Vol. 685. — P. 320–325. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685/320. ■

Получено 01.02.17

© Т. Б. Брянских, Д. В. Кокоуров, 2017 г.