

УДК 66.041.3-65:691.034.9

ТЕОРИЯ И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЬНО-СПУСКОВЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ОБЖИГА ВЕРМИКУЛИТА

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований электрических модульно-спусковых печей, рассмотрен процесс поглощения вермикулитом тепловой энергии, определены оптико-геометрические параметры модулей обжига, приведены рациональные режимные значения температуры и продолжительности обжига для вермикулитовых концентратов. Показана возможность совершенствования и построения энергосберегающих конструкций электрических модульно-спусковых печей.

Ключевые слова: вермикулит, электрическая модульно-спусковая печь, теплоусвоение, тепловое излучение, модуль обжига, коэффициент полезного действия печи, удельная энергоёмкость обжига.

В широком спектре огнеупорных материалов заметное место занимают изделия на основе вспученного вермикулита. Благодаря его слоистой пористой структуре изделия отличаются высокими теплоизоляционными свойствами, что создает возможность их применения для футеровки различных тепловых агрегатов. Вермикулит также является эффективным теплоизоляционным материалом, пористым заполнителем для легких бетонов, из него готовят сухие смеси, в том числе огнезащитные, применяют для звукоизоляции помещений, используют при разливе стали и т. д. [1, 2].

В 2003 г. впервые была предложена концепция электрических модульно-спусковых печей для обжига вермикулита [2–4], получившая развитие в течение более чем десятилетней производственной эксплуатации. Совершенствование печных агрегатов проводили как на основе эмпирического опыта, так и путем исследования аналитических моделей их рабочих процессов.

Цель выполненных исследований — анализ процесса поглощения тепловой энергии вермикулитом, определение оптико-геометрических параметров модулей обжига, выявление рациональных температурно-временных режимов обжига, КПД и удельной энергоёмкости процесса обжига.

На основе электрических модульно-спусковых печей могут быть построены небольшие технологические комплексы для получения высококачественных вспученных продуктов различных фракций не только из вермикулитовых концентратов (в том числе грубообогащен-

ных), но и из конгломератов с высоким содержанием инертного материала [2].

На рис. 1 показана технологическая схема производства вспученного продукта из чистых концентратов с содержанием вермикулита 94–96 %. Пофракционное дозирование сырья при подаче в печь позволяет получать вермикулит любого заданного фракционного состава. Если такая задача не ставится, сырец подается элеватором сразу на дозирование. Быстрое охлаждение вспученного материала несколько повышает прочность его зерен [5], но эта операция может быть исключена, тогда после обжига вермикулит поступает непосредственно в бункер-накопитель.

Устройство трехмодульной печи показано на рис. 2. Печь содержит барабанный дозатор сырья 1 с небольшим бункером 2, рифленным барабаном 3 и

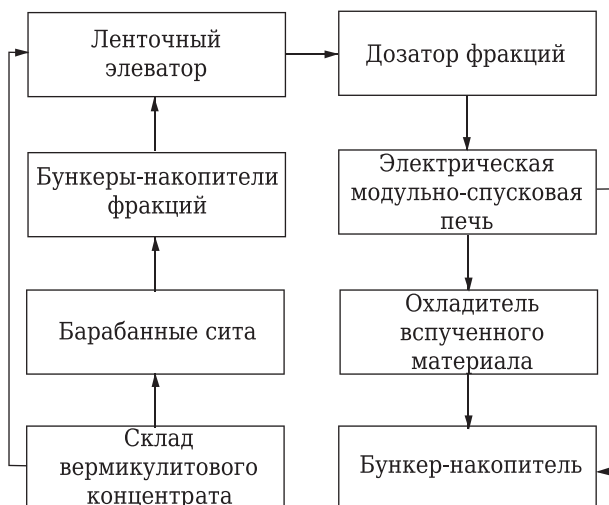


Рис. 1. Технологическая схема производства вспученного вермикулита

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

спусковым лотком 4. В бункере, перед тем как попасть в печь, исходное сырье подогревается до начального значения 95–110 °С, чем обеспечивается максимальная скорость подъема температуры зерен в печи и режим термоудара (не менее 200 °С/с [5]). В корпусе печи на рамах 5 расположены электрифицированные модули обжига 6 с термокрышками 7, под которыми продольно размещены электрические нагреватели, закрепленные на токопроводящих головках 8. Все элементы печи собраны на каркасе 9 с двухслойными термоизолированными стальными стенками и дверцами (на рисунке не показаны).

При обжиге вермикулитовых концентратов вспученный материал поступает в бункер-накопитель 10, выходя из нижнего модуля обжига 6. Если в печи ведется обжиг концентратов другой размерной группы, то рабочие камеры модулей имеют другие оптико-геометрические параметры за счет замены съемных блоков нагревательных элементов [6]. При движении по модулям обжига вермикулит поглощает тепловую энергию и за счет расширения перегретого пара и адсорбированных газов [2] механически трансформируется и вспучивается. Образуется новая чешуйчатопористая структура материала.

Удельная усвоенная (поглощенная) теплота θ_{Σ} , Дж/кг, идет на дегидратацию и выход химически связанной воды $\theta_{\text{х}}$, нагрев сухой части минерала $\theta_{\text{с}}$, фазовый переход физической (межслоевой) и гидратной воды $\theta_{\text{в}}$, перегрев водяных паров $\theta_{\text{п}}$ и адсорбированных газов $\theta_{\text{а.г.}}$.

Баланс тепловых энергий определяется суммой $\theta_{\Sigma} = \theta_{\text{х}} + \theta_{\text{с}} + \theta_{\text{в}} + \theta_{\text{п}} + \theta_{\text{а.г.}}$.

Теплота $\theta_{\text{с}}$ не участвует в механической трансформации материала и аккумулируется во вспученных зернах, постепенно рассеиваясь в окружающую среду.

Энергия механической трансформации $E_{\text{м.т}}$ равна сумме:

$$E_{\text{м.т}} = \theta_{\text{х}} + \theta_{\text{в}} + \theta_{\text{п}} + \theta_{\text{а.г.}}$$

а ее отношение к поглощенной энергии определяет коэффициент полезного действия (КПД) процесса вспучивания:

$$\eta_{\text{м.т}} = \frac{E_{\text{м.т}}}{\theta_{\Sigma}}. \quad (1)$$

Для ковдорского вермикулита КПД структурообразования примерно равен 0,544, для вермикулита Татарского месторождения — 0,577 [2].

Температурно-временная зависимость, характеризующая режимное состояние трехмодульной печи, имеет вид:

$$T_{\text{н}} = \left\{ \frac{\theta_{\Sigma} \cdot \frac{\pi DB [n_{\text{м}} l_{\text{р}} + (n_{\text{м}} - 1) \lambda]}{18 K_{\text{в}} (1 - K_{\text{пор}})}}{t_{\text{об}} \left[\varphi_{\text{нс}} + \frac{\rho_{\text{ш}}}{3} \alpha_{34}^{\text{в}} (\varphi_{\text{ос}} k_{\text{о}} + \varphi_{\text{кс}} k_{\text{к}}) \right] \varepsilon_{\text{н}} \sigma 2 \chi n_{\text{м}} n_{\text{н}} (2l + 4l_0 + r_{\text{мин}})} \right\}^{\frac{1}{4}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{н}}$ — температура поверхности нагревателей, К; D — размерная группа исходного концен-

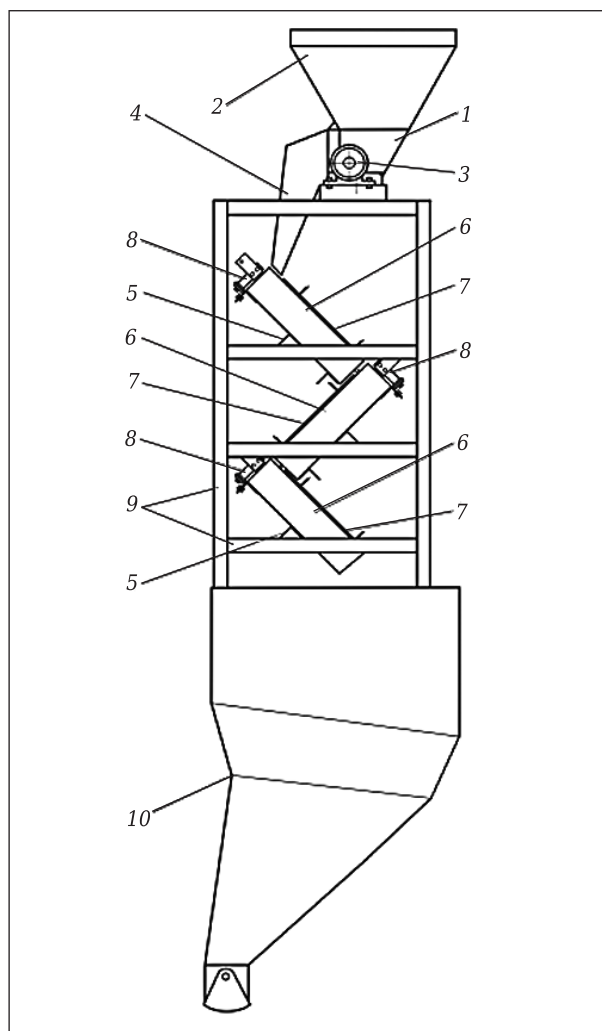


Рис. 2. Электрическая модульно-спусковая печь

трата, м; B — ширина модуля, м; $n_{\text{м}}$ — количество модулей в печи; $l_{\text{р}}$ — рабочая длина модулей, м; l_0 — длина консольных участков нагревателей, м; l — общая длина модулей, м; λ — размер зоны пересыпания, м; $K_{\text{в}}$ — коэффициент вспучивания, м³/кг; $K_{\text{пор}}$ — коэффициент пористости вспученного вермикулита в массиве; $t_{\text{об}}$ — продолжительность обжига, с; $\varphi_{\text{нс}}$ — угловой коэффициент падающего на вермикулит излучения, исходящего с поверхности нагревателя; $\varphi_{\text{кс}}$ и $\varphi_{\text{ос}}$ — угловые коэффициенты эффективного излучения термокрышки и основания модуля, падающего на вермикулит; $\rho_{\text{ш}}$ — отражательная способность поверхности шамотного кирпича; $\alpha_{34}^{\text{в}}$ — поглощательная способность вермикулитовой среды в направлении от основания модуля к термокрышке; $k_{\text{о}}$ и $k_{\text{к}}$ — коэффициенты, учитывающие оптико-геометрические параметры излучающих, поглощающих и отражающих поверхностей рабочих камер модулей и сыпучей среды [7, 8]; $\varepsilon_{\text{н}}$ — излучательная способность или степень черноты нихрома; σ — постоянная Стефана – Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); 2χ

— периметр по сечению нихромовых полос нагревателей, м; $r_{\min}$ — шаг нагревателей, м.

По формуле (2) построен график температурно-временной зависимости 1 (рис. 3) для трехмодульной печи с конструктивными параметрами модуля обжига: $B = 0,92$ м, $n_m = 3$, $l_p = 0,53$ м, $l_0 = 0,575$ м, $\lambda = 0,05$ м.

Рабочая точка Э экспериментальной печи, имеющей такие же значения размеров модуля, соответствует температуре нагревателей $T_n = 758$ °С, постоянной времени печного агрегата, равной средней продолжительности обжига $T_{п.а} = 2,72$ с, и скорости роста температуры $(T_n - 100$ °С) / $T_{п.а} = 241,9$ °С/с. Точка в на кривой 1 соответствует аналитической модели трехмодульной печи с постоянной времени 2,72 с, однако температура нагрева здесь существенно выше, чем в эксперименте, и равна 830 °С.

Введем поправочный коэффициент для корректировки модели путем приведения температуры в кельвинах:

$$k_T = T_n^Э / T_{н(в)}^П = (758 + 273) / (830 + 273) = 0,935. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что несоответствие аналитической и эмпирической моделей составляет всего 6,5 %.

Сделаем параллельный перенос кривой 1 в положение 2 так, чтобы соотношение температур в точках Э и в было равно коэффициенту k_T (0,935).

Точка Б не будет лежать на кривой 2, так как температура в этой точке

$$T_{н(Б)} = k_T \cdot [T_{н(Б)} + 273] - 273 = 704$$
 °С,

т. е. кривая 2 должна быть повернута вокруг точки Э по часовой стрелке, как это показано на рис. 3 (кривая 3).

Отрезок БГ на кривой 3 рис. 3 является нерабочим участком, так как здесь скорость роста температуры меньше минимально достаточной (200 °С/с), поэтому процесс дегидратации вермикулитового сырья будет незавершенным. Линия х — х отражает совокупность точек, соответствующих режиму с минимально достаточной скоростью нарастания температуры, поэтому заштрихованная область вблизи участков АГ и ГБ' является областью рабочих точек печи по эмпирической модели.

Таким образом, аналитическая модель процесса показывает высокую относительно эксперимента точность (6,5 %), хотя кривые 1 и 3 смещены относительно друг друга примерно на 72 °С, поэтому полученный результат можно рассматривать как удовлетворительный.

Коэффициент полезного действия печного агрегата η_n с учетом КПД процесса механической трансформации вермикулита $\eta_{м.т}$ рассчитывается по формуле

$$\eta_n = \frac{\theta_z P_G \eta_{м.т}}{N_э}, \quad (5)$$

а удельная энергоемкость обжига определяется отношением e_y , мДж/м³:

$$e_y = 3600 N_э / P_V, \quad (6)$$

где P_G — массовая производительность печи, кг/с; P_V — объемная производительность печи, м³/с; $N_э$ — потребляемая электрическая мощность, Вт.

По формулам (5) и (6) определяем значения η_n и e_y в характерных точках температурно-временной зависимости (табл. 1).

На рис. 4 и 5 показаны зависимости, построенные с использованием приведенных данных. Энергетически выгодны режимы работы печи в точке А, где достигаются экстремумы главных показателей η_n и e_y . Для получения максимальной производительности наиболее выгоден режим в точке Б', так как здесь наибольшее значение постоянной времени $T_{п.а}$, но удельная энергоемкость

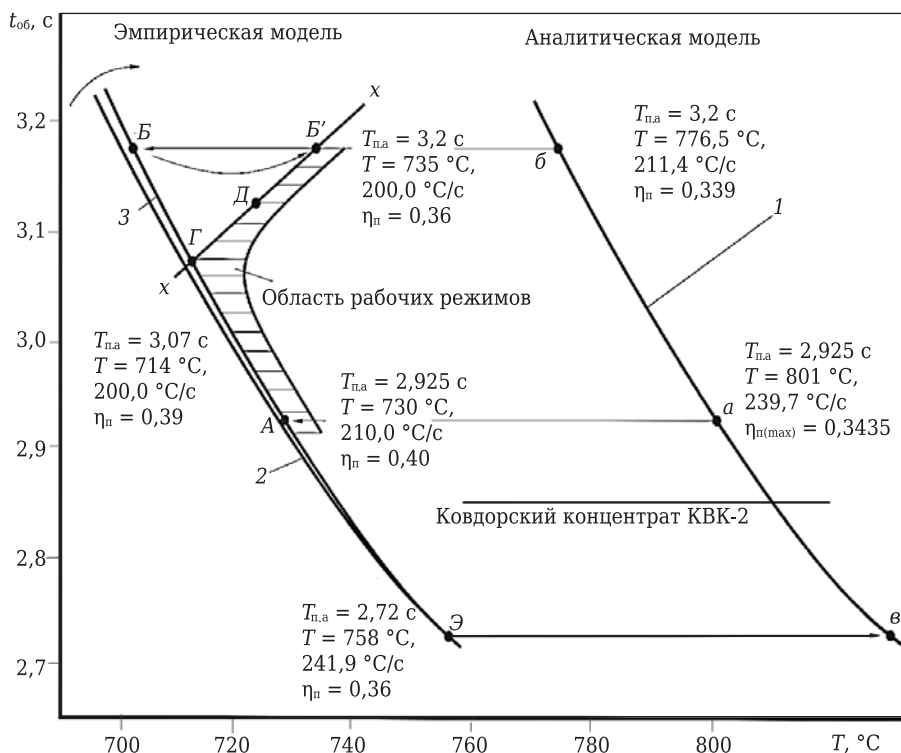


Рис. 3. Графики температурно-временной характеристики трехмодульной печи по аналитической (1) и эмпирической (2) моделям (η_n — коэффициент полезного действия печи)

Таблица 1. Значения КПД печи и удельная энергоёмкость по эмпирической модели

Точка	КПД печного агрегата	Удельная энергоёмкость процесса, мДж/м ³
А	0,40	210,5
Г	0,39	214,1
Б'	0,36	243,2
Д	0,38	222,0

процесса больше на 11,6 %, а КПД печи меньше на 10 %, чем в точке А.

Компромиссным вариантом служит режимная точка Г: здесь снижение производительности относительно максимума составляет около 6 %, КПД и удельная энергоёмкость ухудшаются относительно точки А на 2,5 и 1,7 % соответственно.

Таким образом, рациональные режимные значения температуры и продолжительности обжига вермикулитовых концентратов лежат в заштрихованной области вблизи точек Б', Г и А на рис. 3.

Проведенные исследования и более чем десятилетний опыт производственной эксплуатации электрических модульно-спусковых печей позволили разработать и построить их наиболее совершенную конструкцию, обладающую наилучшими характеристиками. В табл. 2 приведены главные показатели пяти основных печных агрегатов (всего было изготовлено и передано в эксплуатацию 8 печей).

Кроме рассмотренных выше, с 2010 г. еще два печных агрегата работают в г. Ташкенте (Республика Узбекистан) на концентратах Каракалпакского месторождения.

В работе [9] показано, что примерно 42–46 % тепловой энергии θ_0 , поглощенной вермикулитом, остается во вспученном материале, который нагревается до 730–750 °С. Если выпускать материал немного недоовспученным, то часть этой «скрытой» энергии

Таблица 2. Мощность и удельная энергоёмкость модульно-спусковых печей

Печь	Потребляемая мощность, кВт	Удельная энергоёмкость обжига, мДж/м ³
Опытно-промышленная* ¹ :		
вторая	112,2	290,6
третья	108,7	249,9
четвертая* ²	105,6	250,1
Опытная:		
пятая* ³	75,2	235,4
шестая* ⁴	63,4	196,8

*¹ По первой опытно-промышленной печи данные не сохранились.

*² Четвертая опытно-промышленная печь (рис. 6) использовалась для обжига вермикулитовых концентратов Татарского месторождения (Красноярский край), остальные — для обжига концентратов Ковдорского месторождения (Мурманская область).

*³ Приведенные выше результаты теоретических и экспериментальных исследований соответствуют работе с пятой опытной печью.

*⁴ Шестая опытная печь имела другую конструктивную структуру: с последовательно-параллельным сопряжением модулей обжига [2].

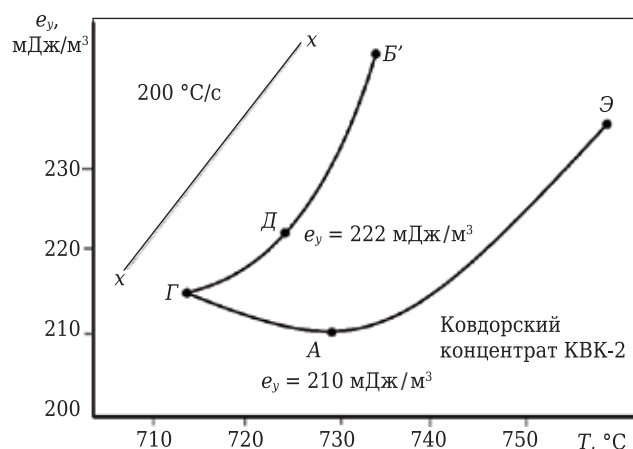


Рис. 4. Зависимость удельной энергоёмкости процесса от температуры

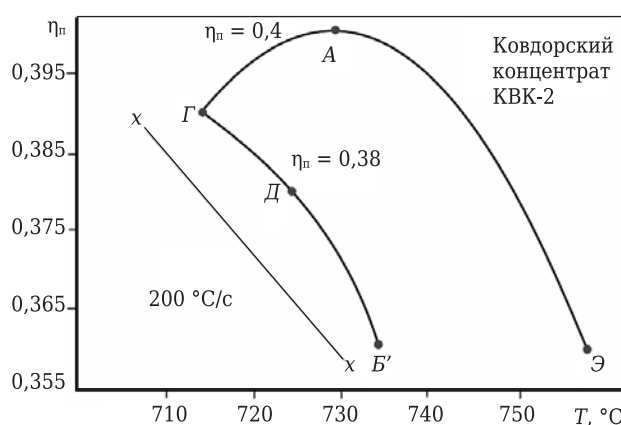


Рис. 5. Зависимость КПД печи от температуры



Рис. 6. Трехмодульная опытно-промышленная печь

можно направить в глубинные слои вермикулитовых зерен. Для этого нужно всего лишь увеличить длительность процесса до 0,6–0,8 с для завершения дегидратации материала. При этом необходимое условие — отсутствие потерь этой энергии в окружающую среду. В структуру печи надо встроить дополнительный неэлектрический модуль и направить в него поток рекуперированной энергии.

Такая структурная трансформация трехмодульной печи позволит уменьшить потребление энергии, снизить удельную энергоемкость процесса обжига, увеличить КПД печного агрегата η_p и приблизить его значение к уровню КПД процесса механической трансформации $\eta_{м.г.}$.

Производственный опыт, полученный при эксплуатации модульно-спусковых печей, позволяет сформулировать ряд практических рекомендаций:

- рациональна конструкция модулей обжига с продольными камерами, образованными нагревателями, установленными на ребро и выполненными из металла с высоким электрическим сопротивлением (например, из нихрома X20H80);
- ширина рабочих камер должна удовлетворять условию

Библиографический список

1. Вермикулит (производство и применение) : сб. науч. тр. — Челябинск : УралНИИИстромпроект. — 1988. — 175 с.
2. **Нижегородов, А. И.** Технологии и оборудование для переработки вермикулита: оптимальное фракционирование, электрический обжиг, дообогащение / А. И. Нижегородов. — Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2011. — 172 с.
3. **Пат. 47082 Российская Федерация, МПК⁷ F 27 В 15/00.** Технологический комплекс и печь для обжига вермикулита / Нижегородов А. И., Залогов А. И.; заявитель и патентообладатель А. И. Нижегородов. — № 2005108234; заявл. 23.03.05; опубл. 10.08.05, Бюл. № 22.
4. **Пат. 85993 Российская Федерация, МПК F 27 В 15/00.** Печь для обжига вермикулита / Нижегородов А. И.; заявитель и патентообладатель ГОУ ИрГТУ. — № 2009114125; заявл. 14.04.09; опубл. 20.08.09, Бюл. № 23.
5. Производство и применение вермикулита / под ред. Н. А. Попова. — М. : Стройиздат, 1964. — 128 с.
6. **Пат. 108128 Российская Федерация, МПК F 27 В 15/14.** Электрическая печь для обжига вермикулита / Нижегородов А. И.; заявитель и патентообладатель ГОУ ИрГТУ. — № 2009114125; заявл. 14.04.09; опубл. 20.08.09, Бюл. № 23.

$$r_{\min} \approx (9 \div 15) D, \quad (7)$$

где D — центр группирования условных диаметров частиц исходного вермикулитового концентрата, определяющий его размерную группу [2] (меньшее значение — для крупных фракций, большее — для мелких). Условие (7) исключает образование заторов вспучивающегося вермикулита в рабочих камерах модулей;

– для достижения наибольшей однородности теплового поля в пространствах обжига модулей необходимо вдоль их боковых стенок устанавливать термоизоляционные вставки, уменьшающие тепловой поток через стенки, а также использовать нагревательные элементы с переменным шагом, уменьшающимся в пристеночных зонах, но с соблюдением условия (7);

– целесообразно применять корпусные конструкции печных агрегатов с термоизолированными стенками и створками дверей, а в случае необходимости использования горячего воздуха как теплоносителя в сопутствующих технологических процессах применять полые стеновые конструкции корпусов для прокачивания воздуха.

Работа по данной теме не завершена.

дов А. И.; заявитель и патентообладатель ГОУ ИрГТУ. — № 2009114125; заявл. 14.04.09; опубл. 20.08.09, Бюл. № 23.

7. **Нижегородов, А. И.** Исследование процессов теплоусвоения вермикулита и переноса теплового излучения в электрических модульно-спусковых печах для обжига вермикулитовых концентратов / А. И. Нижегородов // Огнеупоры и техническая керамика. — 2014. — № 11/12. — С. 40–47.

8. **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. — № 11/12. — С. 29–36.

9. **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. ■

Получено 19.05.15

© А. И. Нижегородов, 2015 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



14th Biennial Worldwide Congress

UNITECR

2015

VIENNA · AUSTRIA
SEPTEMBER 15–18

Unified International Technical
Conference on Refractories

Partnership in Materials
and Technology

UNITECR 2015 — 14-й Всемирный конгресс и Объединенная техническая конференция по огнеупорам

15–18 сентября 2015 г. г. Вена, Австрия

www.unitecr2015.org