

Д. т. н. А. И. Нижегородов (✉)

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

УДК 66.041.3-65:691.365

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ С ВИБРАЦИОННЫМ ПОДОМ ДЛЯ ОБЖИГА ВЕРМИКУЛИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Приведен энергетический анализ электрической печи с вибрационным подом с привлечением ранее полученных аналитических моделей поглощения и новой уточненной модели теплоусвоения вермикулита. Получены температурно-временное уравнение, формулы производительности печного агрегата и удельной энергоёмкости обжига вермикулитовых концентратов. Показано, что печи новой концепции обладают удельной энергоёмкостью не более 77,8 мДж/м<sup>3</sup>, что более чем втрое ниже энергоёмкости пламенных печей для обжига вермикулита.

**Ключевые слова:** электрическая печь с вибрационным подом, вермикулитовые концентраты, удельная энергоёмкость, производительность печи.

### ВВЕДЕНИЕ

Электрические печи для обжига вермикулитовых концентратов и конгломератов из-за высокой стоимости электроэнергии в большинстве регионов страны до недавнего времени не могли конкурировать с пламенными печами, несмотря на относительно низкую удельную энергоёмкость (170 против 230–260 мДж/м<sup>3</sup>). Появление печей с вибрационной подовой платформой с принципиально иной конструктивной структурой [1–3] способно радикально изменить положение дел, так как прогнозные [2, 3] и экспериментальные [4] данные указывают на возможность достижения удельной энергоёмкости 45–65 мДж/м<sup>3</sup> для различных видов и марок вермикулита. Разработка инженерной методики расчета таких энерготехнологических агрегатов становится актуальной задачей. Но прежде необходимо исследовать энергетические соотношения в системе печь – среда, опирающиеся на аналитическую модель поглощения вермикулитом тепловой энергии [5].

Цель настоящей работы — энергетический анализ системы печь – среда с учетом моделей поглощения и теплоусвоения вермикулита и выявление оптимального температурно-временного соотношения при минимальной удельной энергоёмкости процесса.

### ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННОЕ УРАВНЕНИЕ

Поток теплового излучения, падающий на вермикулитовый монослой, находящийся на подовой плите, и

поглощаемый им  $Q_{\text{пор}}$ , Вт, и удельная энергия теплоусвоения  $\theta_{\Sigma}$ , Дж/кг, связаны через массовую производительность печного агрегата  $\Pi_G$ , кг/с, соотношением

$$\theta_{\Sigma} \Pi_G = Q_{\text{пор}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{пор}}$  определяется выражением [5]:

$$Q_{\text{пор}} = \alpha_{\text{в}} I U \varepsilon_{\text{н}} \left\{ 2\varphi_{\text{н.в}} + \varphi_{\text{к.в}} \left[ 2 \frac{\varphi_{14} + \varphi_{34} \varphi_{13} \rho_4}{1 - \rho_{\text{в}} \rho_4 \varphi_{34}^2} + (2\varphi_{\text{Ак}} + 2\varphi_{\text{Вк}} + 2\varphi_{\text{Ск}}) \right] \right\}, \quad (2)$$

представляющим собой аналитическую модель поглощения вермикулитом тепловой энергии.

В формуле (2)  $\alpha_{\text{в}}$  — поглощательная способность однослойного вермикулитового потока,  $\alpha_{\text{в}} = 0,768$ ;  $I$  и  $U$  — действующие значения силы тока, А, и напряжения, В, в электрической цепи нагревателей;  $\varepsilon_{\text{н}}$  — степень черноты нихромовых нагревателей печи,  $\varepsilon_{\text{н}} = 0,96$ ;  $\varphi_{\text{н.в}}$  и  $\varphi_{\text{к.в}}$  — угловые коэффициенты потоков от нагревателей на вермикулит ( $\varphi_{\text{н.в}} = \varphi_{13} = 0,43$ ) и от крышки на вермикулит ( $\varphi_{\text{к.в}} = \varphi_{43} = \varphi_{34} = 0,333$ );  $\varphi_{14}$ ,  $\varphi_{34}$  и  $\varphi_{13}$  — угловые коэффициенты, определяющие оптико-геометрические характеристики условных рабочих камер модулей обжига ( $\varphi_{14} = 0,116$ ,  $\varphi_{34} = 0,333$  и  $\varphi_{13} = 0,43$ );  $\rho_{\text{в}}$  — отражательная способность однослойного вермикулитового потока,  $\rho_{\text{в}} = 0,232$ ;  $\rho_4$  — отражательная способность термоизоляционного покрытия крышки из муллитокремнеземистого войлока,  $\rho_4 = 0,65$ ;  $\varphi_{\text{Ак}}$  (0,128),  $\varphi_{\text{Вк}}$  (0,078) и  $\varphi_{\text{Ск}}$  (0,04) — средние угловые коэффициенты потоков от нагревателей соседних камер модуля обжига [5].

Определим массовую производительность печного агрегата:

$$\Pi_G = m/t, \quad (3)$$

где  $m$  — масса вермикулитового концентрата, одновременно находящегося на трех подовых



А. И. Нижегородов

E-mail: nastromo\_irkutsk@mail.ru

плитах платформы печи, кг;  $t$  — длительность обжига, равная времени движения однослойного потока вермикулита по поверхностям подов, с.

Масса вермикулита по мере его дегидратации в тепловом поле рабочего пространства модулей обжига печи снижается из-за выхода химически связанной и межслоевой воды на 20–24 % [6], поэтому введем поправочный коэффициент 0,78. Совместное решение уравнений (3) и (2) с учетом поправочного коэффициента приводит выражение (1) к виду

$$0,78 \cdot \frac{m}{t} = \alpha_b U \varepsilon_n \left\{ 2\varphi_{н.в} + \varphi_{к.в} \left[ 2 \frac{\varphi_{14} + \varphi_{34} \varphi_{13} \rho_4}{1 - \rho_b \rho_4 \varphi_{34}^2} + (2\varphi_{ак} + 2\varphi_{вк} + 2\varphi_{ск}) \right] \right\}, \quad (4)$$

где  $0,78m$  — масса движущегося однослойного потока вермикулита в пересчете на вспученный материал, которая может быть определена через суммарный объем зерен, одновременно находящихся на трех подах печи:

$$V_{\Sigma} = 0,1667\pi D^3 n, \quad (5)$$

где  $D$  — условный средневзвешенный диаметр вспученного зерна, м;  $n$  — общее количество зерен на трех подовых плитах.

На рис. 1 показаны распределение условных диаметров частиц основной фракции ( $5,0 \pm 2,0$ ) мм вермикулитового концентрата Medium Кокшаровского месторождения [4] и гистограммы остатков на ситах. Доля основной фракции  $D_{ср5,0}$  62 %, фракции со средним условным диаметром  $D_{ср2,2} = 2,2$  мм 3,5 %, промежуточной фракции  $D_{ср3,1} = 3,1$  мм 24,5 %, крупной фракции  $D_{ср7,8} = 7,8$  мм 10 %.

Рассчитаем условный средневзвешенный диаметр концентрата Medium, мм:

$$D = \frac{2,2 \cdot 0,035 + 3,1 \cdot 0,245 + 5,0 \cdot 0,62 + 7,8 \cdot 0,1}{0,035 + 0,245 + 0,62 + 0,1} = 4,7,$$

определим плотность вспученного вермикулитового зерна «в теле»  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho = \rho_n / (1 - \kappa_{пор}). \quad (6)$$

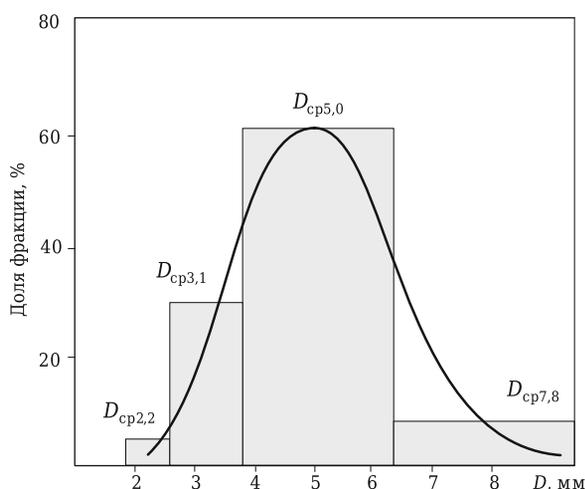


Рис. 1. Распределение условных диаметров частиц концентрата Medium

Так как истинная плотность — это плотность вещества без учета пористости, то в данном случае, так как зерна вермикулита пористые, применен термин плотность «в теле»;  $\rho_n$  — насыпная плотность вермикулита, кг/м<sup>3</sup>;  $\kappa_{пор}$  — коэффициент пористости в массиве вермикулита (~0,365 [7]).

На примере вермикулитового концентрата Medium [8] с  $D = 0,0047$  м определим  $n$  при ширине и длине пода соответственно  $B = 0,96$  м и  $L = 0,5$  м и при условии рядной (не шахматной) структуры расположения зерен на поверхностях пода. Учитывая, что в исходном концентрате содержание вермикулита составляет 90 % [4] (остальное — инертный, невспучивающийся материал), получим  $n = 0,9(0,96/0,0047) \cdot (0,4/0,0047) \cdot 3 = 46877$ , где 0,9 — коэффициент, учитывающий наличие невспучивающихся частиц концентрата.

Плотность зерен «в теле» при насыпной плотности  $\rho_n \sim 90$  кг/м<sup>3</sup> вспученного материала из концентрата Medium, полученного при обжиге в одиночном однофазном модуле [4], по формуле (6) будет равна  $\rho = 141,7$  кг/м<sup>3</sup>. Выражение, определяющее массу однослойного вермикулитового потока на трех подовых плитах печи  $m_b$ , имеет вид  $m_b = 0,78 \cdot 0,1667\pi D^3 \cdot n \rho = 0,249$  кг. Здесь в качестве примера принят концентрат Medium с  $\rho_n \sim 90$  кг/м<sup>3</sup> и  $D = 0,0047$  м для возможности адекватного сопоставления расчетных результатов с результатами экспериментов, приведенными в работе [4]. Уравнение (4) с учетом равенства [5]

$$IU/f_n = \sigma T^4 \quad (7)$$

приведем к виду

$$\theta_{\Sigma} \frac{m_b}{t} = \alpha_b \sigma T^4 \varepsilon_n f_n \left\{ 2\varphi_{н.в} + \varphi_{к.в} \left[ 2 \frac{\varphi_{14} + \varphi_{34} \varphi_{13} \rho_4}{1 - \rho_b \rho_4 \varphi_{34}^2} + (2\varphi_{ак} + 2\varphi_{вк} + 2\varphi_{ск}) \right] \right\}, \quad (8)$$

где  $\sigma$  — постоянная Стефана – Больцмана, равная  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) [9];  $f_n$  — площадь всех излучающих поверхностей нагревателей, м<sup>2</sup>;  $T$  — температура нагревателей, К.

Решая уравнение (8) относительно температуры нагревателей, получим температурно-временную характеристику печи с вибрационным подом:

$$T = \sqrt[4]{\frac{\theta_{\Sigma} m_b}{t \cdot \alpha_b \sigma \varepsilon_n f_n \left\{ 2\varphi_{н.в} + \varphi_{к.в} \left[ 2 \frac{\varphi_{14} + \varphi_{34} \varphi_{13} \rho_4}{1 - \rho_b \rho_4 \varphi_{34}^2} + (2\varphi_{ак} + 2\varphi_{вк} + 2\varphi_{ск}) \right] \right\}}}. \quad (9)$$

Далее рассмотрим баланс удельных энергий, усваиваемых вермикулитом при его дегидратации и вспучивании.

### БАЛАНС ЭНЕРГИЙ ТЕПЛОУСВОЕНИЯ ВЕРМИКУЛИТА

Уравнение баланса удельных энергий для 1 кг вермикулитового концентрата можно выразить суммой  $\theta_{\Sigma}$ , кДж/кг [10]:

$$\theta_{\Sigma} = \theta_{100} + \theta_x + \theta_c + \theta_b + \theta_{п} + \theta_{а.г.} \quad (10)$$

где  $\theta_{100}$  — теплота предварительного нагрева концентрата за счет тепловых потерь до  $\sim 100$  °С (является начальным условием и в дальнейшем не учитывается);  $\theta_x$  — энергия выхода химически связанной воды (196,9 кДж/кг [11]);  $\theta_c$  — энергия нагрева сухой части вспученного минерала (551,9 кДж/кг [10]);  $\theta_b$  — энергия фазового перехода межслоевой и химически связанной воды (235,3 кДж/кг [10]);  $\theta_n$  — энергия перегрева водяных паров (108,7 кДж/кг [10]);  $\theta_{a.g}$  — энергия нагрева адсорбированных газов (75,2 кДж/кг [10]).

Суммарная удельная энергия теплоусвоения вермикулитового концентрата Ковдорского месторождения без учета  $\theta_{100}$  по ранее приводившимся данным (например, в работе [10]) составляла  $\theta_{\Sigma k} = 1209$  кДж/кг, концентрата Татарского месторождения —  $\theta_{\Sigma T} = 1151$  кДж/кг. Расчеты, проведенные для кокшаровского вермикулита по ранее разработанной методике [10] с учетом температуры обжига (880 °С), установленной экспериментально [4], дали следующий результат:  $\theta_{\Sigma k1} = 1360$  кДж/кг.

Ранее при анализе процессов дегидратации и структурообразования вермикулита принималось допущение о том, что на выходе из печи все зерна вспученного материала достигают температуры электрических нагревателей. Если для модульно-спусковых печей это допущение было более или менее оправданно [10], так как вермикулит в модулях обжига двигается внутри пространства рабочих камер, образованных полосовым нихромом, то для печей с вибрационным подом, в которых рабочие камеры условны, а нагреватели располагаются над вермикулитом, данное допущение является весьма грубым. Сейчас, когда получены результаты экспериментальных исследований физической модели печи с вибрационным подом [4], определение суммарной удельной энергии теплоусвоения можно проводить, опираясь на них.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Конструкция электрических модульно-спусковых печей не позволяла определить температуру вермикулитовых зерен на выходе из печи из-за больших расстояний между ними. Новые печи с вибрационным подом отличаются тем, что концентрация вспученного материала на поверхности модуля (подовой плите) во много раз больше. За счет вибротранспортирования вермикулит движется монослоем, скученно, практически без зазоров между зёрнами, что позволяет получить сплошную вермикулитовую поверхность и измерить его температуру.

При проведении экспериментов [4] температуру вермикулита измеряли в разных точках подовой плиты между крепежными головками с помощью пирометра DT-8835 (точность в диапазоне 50–1000 °С  $\pm 1,5$  %) при различных темпера-

турных режимах печи. В установившемся тепловом режиме при средней плотности вспученного продукта около 92 кг/м<sup>3</sup> была зафиксирована средняя по нескольким измерениям температура 512 °С. При этом средняя температура поверхности нихромовых нагревателей составила 926 °С [10]. Эксперимент показал, что в процессе обжига вермикулита в печи с вибрационным подом его температура не сравнивается с температурой нихромовых нагревательных элементов.

## Новая модель теплоусвоения

Вернемся к уравнению баланса удельных энергий (10) и проведем перерасчет значений его членов. Энергия дегидратации минерала остается прежней —  $\theta_x \approx 196,9$  кДж/кг. Теплота  $\theta_c$ , накапливаемая сухим веществом вспученных зерен, будет меньше:

$$\theta_c = c_{\kappa T} \cdot m \cdot 0,816 \Delta T = 860 \cdot 1,225 \cdot 0,816 \cdot (512 - 100) = 361,9 \text{ кДж},$$

где  $c$  — средняя удельная теплоемкость вермикулитовых концентратов,  $c \sim 980$  Дж/(кг·°С) [12];  $\kappa_T$  — коэффициент, учитывающий возрастание удельной теплоемкости минерала при повышении температуры [11],  $\kappa_T \sim 1,225$ ;  $m$  — масса концентрата (1 кг); 0,816 — доля твердой фазы [10]; (512 – 100) — перепад температур  $\Delta T$ , °С.

Теплота фазового перехода химически связанной и межслоевой воды при 100 °С остается прежней —  $\theta_b = 235,3$  кДж. Энергия перегрева водяного пара уменьшится:

$$\theta_n = c_n \cdot m \cdot 0,115 \Delta T = 1593,4 \cdot 1 \cdot 0,115 \cdot (512 - 100) = 75,5 \text{ кДж/кг},$$

где  $c_n$  — средняя удельная теплоемкость водяного пара в диапазоне 100–500 °С,  $c_n \sim 1593,4$  Дж/(кг·°С) [13].

Теплота нагрева адсорбированного углекислого газа уменьшится и будет равна:

$$\theta_{a.g} = c_{CO_2} \cdot m \cdot 0,115 \Delta T = 1102 \cdot 1 \cdot 0,115 \cdot (512 - 100) = 52,2 \text{ кДж/кг}.$$

Полная энергия теплоусвоения вермикулитового концентрата Кокшаровского месторождения будет равна:

$$\theta_{\Sigma k1} = \theta_x + \theta_c + \theta_b + \theta_n + \theta_{a.g} = 196,9 + 361,9 + 235,3 + 75,5 + 52,2 = 921,8 \text{ кДж/кг}.$$

Полученное значение соответствует чистому вермикулитовому концентрату. Здесь также следует учесть, что в концентрате присутствует 10 мас. % инертного материала, который тоже «потребляет» энергию:

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

где 0,1 — массовая доля инертного материала в 1 кг концентрата;  $c_i$  — удельная теплоемкость инертного материала (для песка в диапазоне 20–600 °С,  $c_i$  в среднем равна 942,5 Дж/(кг·°С)

[14]);  $m$  — масса исходного концентрата (1 кг);  $\Delta T$  — изменение температуры при нагреве, °C.

Таким образом, уравнение (9) примет окончательный вид:

$$T = \sqrt[4]{\frac{[0,9 \cdot (\theta_x + \theta_c + \theta_b + \theta_{a,r}) + \theta_n] \cdot m_b}{t \cdot \alpha_n \sigma \varepsilon_n f \left\{ 2\varphi_{n,b} + \varphi_{k,v} \left[ 2 \frac{\varphi_{14} + \varphi_{34} \varphi_{13} \rho_4}{1 - \rho_0 \rho_4 \varphi_{34}^2} + (2\varphi_{A,K} + 2\varphi_{B,K} + 2\varphi_{C,K}) \right] \right\}}} \quad (11)$$

**Температурно-временная зависимость, производительность, энергоёмкость**

Если принять длительность обжига  $t$  соответствующей экспериментальному значению 3,31 с, по формуле (11) получим температуру на нагревателях 1187 K = 914 °C. Расчет в кельвинах по сравнению с экспериментально полученной температурой (926 °C = 1199 K) дает расхождение 1,0 %. Очевидно, что такая точность конечной формулы (11) является неожиданным и благоприятным наложением неточностей

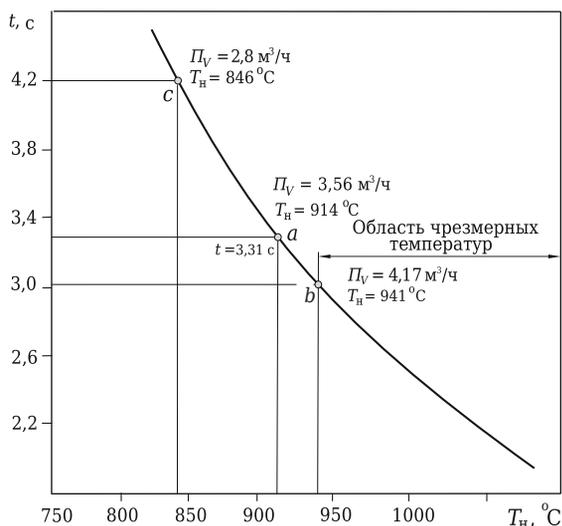


Рис. 2. Температурно-временная кривая

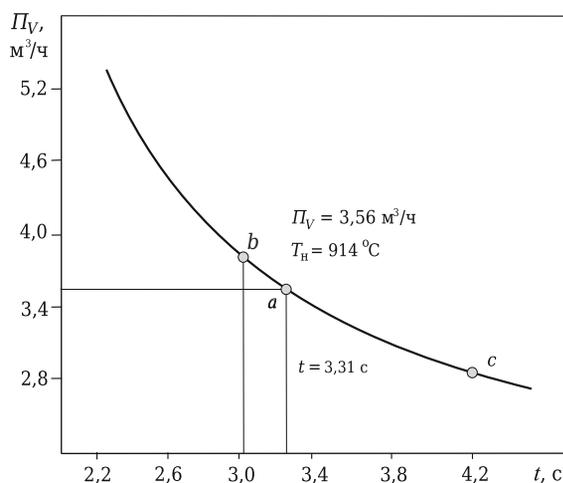


Рис. 3. Зависимость производительности печи от длительности обжига

вложенных в нее аналитических моделей поглощения вермикулитом тепловой энергии, теплопереноса и теплоусвоения вермикулита. Зададим ряд значений  $t$  и построим по выражению (11) температурно-временную зависимость (рис. 2). Рабочая точка  $a$  соответствует температурно-временному режиму, близкому к установившемуся тепловому режиму печи, достигнутому в эксперименте [4] при средней плотности вспученного вермикулита 90–92 кг/м³. Точка  $b$  на графике ограничивает верхний порог температур, за которым происходит налипание мелкодисперсных частиц на поверхность (особенно нагревателей). Точка  $c$  характеризуется небольшой температурой нагревателей, но производительность печи здесь заметно снижается. Температурно-временной режим электрической печи с вибрационным подом следует ограничить окрестностями точки  $a$ , оставаясь в интервале  $t$  от 3,1 до 3,5 с. Но это условие может быть иным при обжиге вермикулитовых концентратов других размерных групп. Зависимость объема вспученных зерен в массиве от объема тех же зерен «в теле» выражается аналогично зависимости (6):

$$V = V_{3\Sigma} / (1 - \kappa_{пор}), \quad (12)$$

а часовая объемная производительность печи определяется формулой

$$P_V = V \cdot 3600 / t.$$

Пренебрегая объемом 10 % инертного материала, получим  $V = 0,0035 \text{ м}^3$  и определим производительность печи:  $P_V = 3,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Производительность печи, определенная пересчетом экспериментального значения для одиночного модуля [14], равна  $3,56 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Если за базовое принять это значение, то расчетная производительность дает результат, завышенный на 6,7 %.

Введем корректирующий коэффициент  $k = 0,937$ . Тогда формула объемной производительности печи с вибрационным подом примет вид

$$P_V = k \frac{V \cdot 3600}{t}. \quad (13)$$

По формуле (13) построена зависимость  $P_V$  от  $t$  (рис. 3). С переходом от режимной точки  $t_a$  к точке  $t_c$  печь теряет производительность, но эта область может быть рекомендована при обжиге вермикулитовых концентратов больших размерных групп со средневзвешенным условным диаметром 7–8 мм и более. Область значений  $t$  в интервале от  $t_a$  до  $t_b$  может быть рекомендована для мелких концентратов, так как здесь производительность печи увеличивается при одновременном снижении температуры нагревателей (см. рис. 2).

Используя формулу (7) для температурно-временного соотношения  $T_n$  (1187 K) -  $t$  (3,31 с) с учетом площади нагревательных элементов на одном модуле  $f_n = 0,228 \text{ м}^2$  ( $f_n = 0,282 \text{ м}^2$ ), получим

$$IU = \sigma T_n^4 f_n.$$

Тогда удельную энергоёмкость обжига можно выразить соотношением

$$e_y = \frac{3\sigma T_n^4 f_n}{P_V} \cdot 3600, \quad (14)$$

где  $3\sigma T_n^4 f_n$  — тепловая мощность, потребляемая печным агрегатом.

Подставляя в формулу (14) значения температуры нагревателей и производительности  $P_V = 3,56 \text{ м}^3/\text{ч}$ , при которых была достигнута плотность вспученного вермикулита [4]  $90\text{--}92 \text{ кг}/\text{м}^3$ , определим  $e_y$ , соответствующую точке *a* (см. рис. 1), равную  $77,86 \text{ мДж}/\text{м}^3$ , что на  $4,6 \%$  меньше, чем в эксперименте (для кокшаровского вермикулита  $81,6 \text{ мДж}/\text{м}^3$  [4]). Построим график изменения  $e_y$  от  $T_n$  модулей обжига печи (рис. 4). График представляет собой гиперболическую кривую. Чем выше  $T_n$ , тем ниже  $e_y$ , но и эта зависимость проявляется слабо. Так, в точке *b* энергоёмкость равна  $77,79 \text{ мДж}/\text{м}^3$ , а в точке *c* —  $78,14 \text{ мДж}/\text{м}^3$ ; расхождение составляет всего  $0,45 \%$ . Более существенных изменений можно ожидать при обжиге других размерных групп и видов вермикулитовых концентратов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, энергетический анализ системы печь — среда с учетом моделей поглощения и теплоусвоения вермикулита показал зону оптимального соотношения температур и длительности обжига вермикулитовых кокшаровских концентратов пятой размерной группы. Полученные зависимости — температурно-временное уравнение и формулы производительности и удельной энер-

## Библиографический список

1. Пат. 166554 Российская Федерация, МПК F 27 В 9/06. Электрическая печь с вибрационной подовой платформой / Нижегородов А. И.; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исслед. техн. ун-т. — № 2015155496/02; заявл. 23.12.15; опубл. 27.11.16, Бюл. № 33.
2. Нижегородов, А. И. К исследованию аналитических моделей систем для подачи сыпучих материалов в печь с вибрационной подовой платформой / А. И. Нижегородов // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та. — 2015. — № 12. — С. 223–229.
3. Брянских, Т. Б. Трехмодульная электрическая печь для обжига вермикулита и других сыпучих материалов с вибрационной подачей сырья / Т. Б. Брянских // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та. — 2016. — № 5. — С. 10–18.
4. Нижегородов, А. И. Испытания новой альтернативной электрической печи для обжига вермикулитовых концентратов / А. И. Нижегородов, Т. Б. Брянских, А. Н. Гаврилин [и др.] // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2018. — Т. 329, № 4. — С. 142–150.

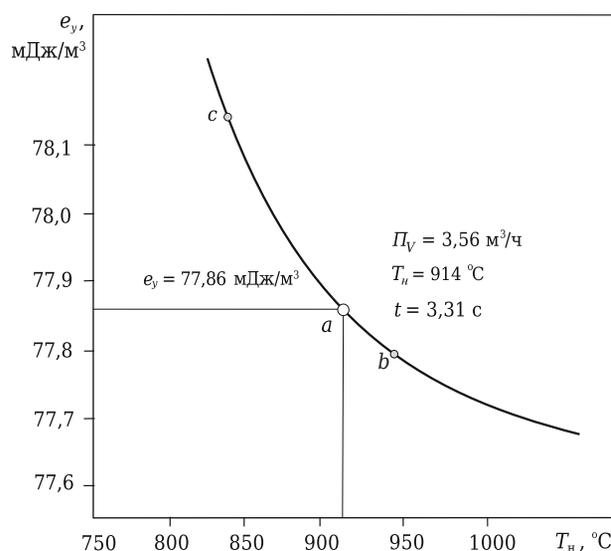


Рис. 4. Зависимость удельной энергоёмкости обжига от температуры нагревателей печи

гоёмкости хорошо соотносятся с эмпирическими данными, приведенными ранее [4]. Достигнутое значение удельной энергоёмкости в электрической печи с вибрационным подом  $e_y = 77,86 \text{ мДж}/\text{м}^3$  показывает, что такие печи являются энергосберегающими и конкурентоспособными на рынке вермикулита и вермикулитовых продуктов.

Полученные результаты являются основой для инженерной методики расчета новых энерготехнологических агрегатов, которые вскоре смогут заменить морально устаревшие и пожаровзрывоопасные пламенные печи, работающие на углеводородном топливе.

5. Нижегородов, А. И. Энерготехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов / А. И. Нижегородов, А. В. Звездин. — Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. — 250 с.
6. Зедгенизов, В. Г. Эффективность использования многомодульных модификаций электрических печей для обжига вермикулита / В. Г. Зедгенизов, А. И. Нижегородов // Строительные материалы. — 2009. — № 12. — С. 51–53.
7. Нижегородов, А. И. Оптимизация размерных рядов вермикулитовых концентратов на основе анализа кластерной модели сыпучих массивов / А. И. Нижегородов // Строительные и дорожные машины. — 2010. — № 4. — С. 13–16.
8. Приморский вермикулит [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.primver.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4](http://www.primver.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=4) [ru(11. 01. 2010)].
9. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. — М.: Наука, 1968. — 940 с.
10. Нижегородов, А. И. Технологии и оборудование для переработки вермикулита: оптимальное фрак-

ционирование, электрический обжиг, дообогащение / А. И. Нижегородов. — Иркутск : Изд-во ИрГТУ. 2011. — 172 с.

11. **Хвостенков, С. И.** О теплоте гидратации и магнитной восприимчивости вермикулита / С. И. Хвостенков, О. А. Залкинд // Горно-металлург. ин-т Кольского ф-ла АН СССР: сб. науч. тр., 1966. — С. 90–100.

12. Методические рекомендации по применению классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Слюда. М., 2007 [Электронный ресурс] / Режим доступа

: <http://amurinform.ru/wp-content/uploads/2015/10/metrek.-slyuda1.pdf> (16.01.19).

13. **Кошкин, Н. И.** Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич ; под ред. Д. И. Сахарова. — М. : Физматгиз, 1960. — 208 с.

14. Расчет нагревательных и термических печей : справ. изд. ; под ред. В. М. Тымчака и В. Л. Гусовского. — М. : Metallurgia, 1983. — 480 с. ■

Получено 10.05.18

© А. И. Нижегородов, 2019 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**UNITECR 2019** Refractories for the Future:  
Collaboration among Customers, Manufactures and Academia in Pursuit of Further High-Temperature Technology

**Дата** 13–16 октября 2019 г.

**Место** Pacifico Yokohama  
г. Йокогама, Япония

**Темы:**

- Огнеупоры для производства:
  - железа и стали
  - стекла
  - цемента
- Огнеупоры для цветной металлургии
- Огнеупоры для нефтехимических процессов
- Огнеупоры для сжигания отходов
- Сырье
- Экологическая устойчивость и переработка сырья
- Достижения в области производства и оборудования
- Огнеупорные инженерные системы и дизайн
- Новые разработки
- Базовая наука
- Энергосбережение и теплоизоляция
- Тестирование огнеупоров
- Образование
- Промышленное применение огнеупоров
- Высокотемпературная инженерная керамика
- Сотрудничество между клиентами, производствами и научными организациями

Hosted by TARJ. Technical Association of Refractories, Japan

<http://unitecr2019.org/index.html>