

Д. т. н. А. И. Нижегородов (✉), А. В. Звездин

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

УДК 622.367.8:66.046.44].621.365

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭКСЕРГИИ ВЕРМИКУЛИТА В ЭНЕРГИЮ ЕГО МЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИ ОБЖИГЕ В ЭЛЕКТРОПЕЧАХ С «НУЛЕВЫМ» МОДУЛЕМ

Рассмотрены модели процессов теплоусвоения и температуропроводности вермикулита при обжиге в электрических печах с «нулевым» модулем, использующим внутреннюю тепловую эксергию для механической трансформации его зерен без внешнего источника тепла. Приведены анализ моделей с учетом запасенных энергий мелких фракций вермикулита и инертного материала и оценка их влияния на теплоусвоение и структурообразование более крупных фракций.

Ключевые слова: эксергия, вермикулит, электрическая печь, теплоусвоение, температуропроводность, модуль обжига, «нулевой» модуль.

ВВЕДЕНИЕ

Обжиг вермикулита в электрических печах имеет уже 12-летний опыт. Каждый этап их совершенствования — переход от трехмодульных печей [1] к шестимодульным и шестимодульным с последовательно-параллельным сопряжением модулей (ППС-печи) [2], применение электронагревателей с переменным сечением [3], их установка с переменным шагом [2] и др. Все это позволило существенно повысить КПД таких агрегатов (0,449–0,467) и уменьшить удельную энергоемкость обжига (211–224 мДж/м³).

Новым техническим решением стал неэлектрифицированный «нулевой» модуль, установленный последовательно в цепь электрических модулей [4]. Он позволяет использовать тепловую эксергию, накопленную вермикулитом в электрических модулях, и тепловое излучение мелких фракций вермикулита и инертного материала для завершения механической трансформации вермикулита (структурообразования) при отсутствии внешнего источника тепла. Цель настоящей работы состоит:

- в исследовании новой модели теплоусвоения вермикулита в условиях незавершившихся процессов дегидратации и структурообразования его зерен с последующим завершением за счет накопленной тепловой эксергии;
- в исследовании модели температуропроводности при кондуктивном переносе эксергии в глубинные слои зерен;
- в оценке энергоэффективности электрических модульно-спусковых печей с дополнительным «нулевым» модулем.

Термин «эксергия» означает качественную энергию, технически пригодную к совершению полезной работы при отсутствии равновесия с окружающей средой. Наш частный случай является особым: накопленная в вермикулите тепловая эксергия за счет ее кондуктивного переноса по чешуйкам вглубь его зерен переходит в энергию дегидратации и приводит к совершению механической работы — структурообразованию вермикулита. Показано [5], что примерно 45 % теплоты, усвоенной вермикулитом, остается во вспученном и нагретом примерно до 750 °С материале («сухой» его части). Эта часть энергии Q_c рассматривалась как потерянная, что соответствовало упрощенной модели, согласно которой процессы теплоусвоения и структурообразования завершались под действием внешнего источника лучистой энергии [6]. Но теплоусвоение можно прервать на выходе из нижнего электрического модуля (рис. 1), перенести его окончание в «нулевой» модуль 7, использующий эксергию вермикулита, и тогда снизить потребляемую мощность печи. Теплота Q_c в отсутствие внешнего источника теплоты в условиях незавершенного теплоусвоения станет равной $k_t Q_c$ (k_t — коэффициент полноты теплоусвоения, учитывающий долю поглощенной вермикулитом энергии) и будет переходить в глубинные слои зерен, в которых дегидратация и механическая трансформация еще не завершились.

Электрическая печь с «нулевым» модулем (см. рис. 1) имеет дозатор концентрата 1 (вермикулитовый концентрат КВК-4 Ковдорского месторождения показан на рис. 2, а) и спусковой лоток 2, направляющий сырье на верхний электрический модуль обжига 3. Пересыпаясь по ним, вермикулит начинает вспучиваться за счет теплового излучения электронагревателей. Из-за настройки печи на пониженный температурный режим те-



А. И. Нижегородов

E-mail: nastromo_irkutsk@mail.ru

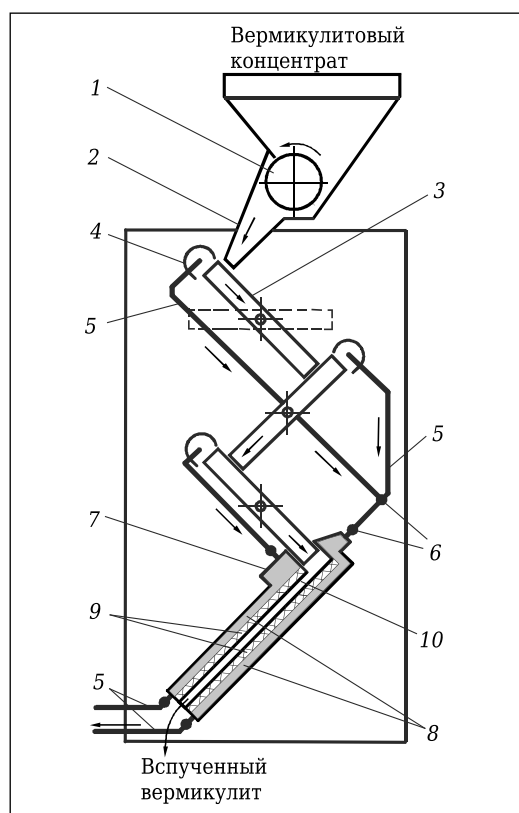


Рис. 1. Трехмодульная печь с дополнительным «нулевым» модулем

плоусвоение и структурообразование зерен не завершаются к моменту их выхода из нижнего электрического модуля, поэтому зерна основной фракции и более крупные остаются недовспученными (рис. 2, б). Далее вермикулит поступает в щелевидное пространство 10, поверхности которого выполнены из жаростойкой стали с высокой отражательной способностью и изолированы материалом 9. Здесь все процессы завершаются и вермикулит становится таким, как на рис. 2, в.

Электрические модули печи снабжены рекуператорами 4, поглощающими утечки лучистой энергии и тепло конвективных потоков, идущие через верхние торцы модулей. Поток теплоносителя — нагретый до 380–400 °С воздух, распределяемый по трубопроводам 5 и коллекторам 6, прокачивается по камерам 8, благодаря которым теплообмен между

вермикулитом, находящимся в пространстве 10, и окружающей средой практически сводится к нулю.

Исходная упрощенная модель была основана на условии заверщенного теплоусвоения [5, 6] и выражалась равенством

$$Q_{\Sigma} = Q_{100} + Q_x + Q_v + Q_n + Q_r + Q_c, \quad (1)$$

где Q_{100} — теплота, усвоенная концентратом в предварительном нагреве до 100 °С, является начальным условием и в дальнейшем анализе не учитывается.

Суммарная энергия Q_{Σ} идет на дегидратацию химически связанной воды Q_x (~197 кДж/кг), фазовый переход адсорбированной и гидратной воды Q_v (~259 кДж/кг), перегрев водяных паров Q_n (~119 кДж/кг), адсорбированных газов Q_r (~82 кДж/кг) и нагрев «сухой» части минерала Q_c (~552 кДж/кг). Значение Q_{Σ} для ковдорских концентратов, полученное расчетом по формуле (1), равно 1209 кДж/кг [5]. Как отмечено в публикациях [5, 6], Q_c не участвует в механической трансформации зерен вермикулита, аккумулируется в них и потом рассеивается. Новая модель рассматривает ее как «скрытую» в зернах тепловую эксергию, частично способную путем кондуктивного переноса проникать из внешних горячих слоев в глубинные слои, где все процессы еще в стадии развития. Модель рассматривает и перенос части излучения, идущего от вспученных мелких зерен, теплоусвоение в которых из-за их размеров уже завершилось, на крупные недовспученные зерна, поступившие в «нулевой» модуль, а также перенос части теплоты частиц инертного материала на те же крупные зерна.

Если доля инертного материала $(1 - k_v)$ регламентирована содержанием вермикулита в концентрате, которое задается паспортом на каждую партию и составляет для разных видов и размерных групп концентратов 4–6 %, то для долей фракций нужен критерий, которым определялись бы значения коэффициентов k_m и k_k , учитывающих доли вермикулита мелкой и крупной фракций соответственно. Этот критерий можно взять из распределения размеров частиц различных видов и размерных групп концентратов простым разделением на стандартных ситах.

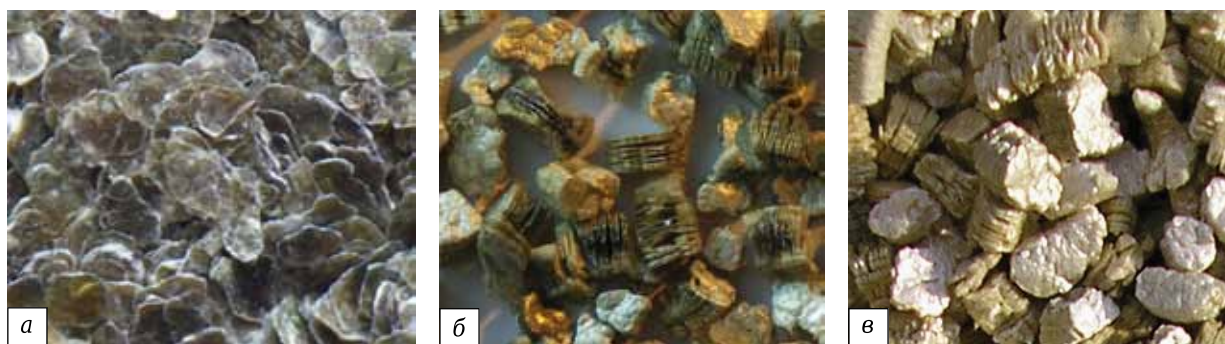


Рис. 2. Вермикулитовый концентрат (а), недовспученный (б) и полностью вспученный (в) вермикулит

На рис. 3 показаны кривые распределения татарского КВТ-1 и ковдорского КВК-4 концентратов и гистограммы остатков на ситах. Доля основной фракции ($-5 + 2,5$ мм) и более крупных частиц КВК-4 равна 74,0 %, а все, что меньше, составляет 26,0 %. Для КВТ-0,5 доли равны соответственно 71,7 % — основная фракция ($-0,63 + 0,31$ мм и более крупные частицы) и 28,3 % мелкая фракция [5]. Анализ этих соотношений других размерных групп и видов концентратов, в том числе кокшаровских, показывает схожее распределение. Поэтому изменение значений долевых коэффициентов можно задать диапазонами $k_m = 0,26 \div 0,29$ ($k_{m,ср} = 0,275$) и $k_k = 0,71 \div 0,74$ ($k_{k,ср} = 0,725$).

Рассчитаем средневзвешенный диаметр зерен крупных и мелких фракций. Доля основной фракции ($-5 + 2,5$ мм) составляет 62,6 %, а более крупных частиц 11,4 % [5], поэтому искомый параметр $D_{св}$ крупных фракций будет равен:

$$D_{св} = \frac{3,75 \cdot 0,624 + 6,5 \cdot 0,114}{0,624 + 0,114} = 4,2,$$

где 3,75 — средний размер частиц в основной фракции, мм; 6,5 — размер крупной фракции, мм.

Доля мелкой фракции ($-2,5 + 1,25$ мм) составляет 24,0 %, а доля частиц фракции мельче 1,25 мм равна 2,0 % [8]. Искомый параметр для зерен мелких фракций будет равен:

$$D_{св} = \frac{1,875 \cdot 0,24 + 0,78 \cdot 0,02}{0,24 + 0,02} = 1,79,$$

где 1,875 — средний размер частиц в мелкой фракции, мм; 0,94 — средний размер частиц фракции $-1,25 + 0,63$ мм и мельче.

Рассмотрим количественные соотношения зерен в долях КВК-4. Для вспученных зерен плотность в теле ρ_t и насыпная плотность ρ_n связаны с формулой $\rho_t = \rho_n / (1 - k_{пор})$. Коэффициент пористости $k_{пор}$ показывает долю объема пустот в общем объеме массива и может варьироваться в зависимости от кластерной модели [5]. Для вспученных концентратов КВК-4 ρ_n в среднем составляет около 90 кг/м³. При $k_{пор} \sim 0,365$ [5] ρ_t составит около 140 кг/м³. Если в 1 кг концентрата доля основных и крупных зерен равна 0,74 кг, то мелкие имеют массу 0,26 кг. После вспучивания они теряют примерно 18 % из-за выхода химически связанной и слоевой воды и массы долей снижаются до 0,61 и 0,21 кг.

Масса одного зерна $D_{св} = 4,2$ мм равна $m = 4/3\pi r^3 \rho_t = 4/3 \cdot 3,14 \cdot 2,1^3 \cdot 10^{-9} \cdot 140 = 5,4 \cdot 10^{-6}$ кг, тогда количество зерен основной и более крупной фракций будет равно $k_k = 0,61/5,4 \cdot 10^{-6} = 112963$. Масса одного зерна со средневзвешенным $D_{св} = 1,79$ мм равна $m = 4/3\pi r^3 \rho_t = 4/3 \cdot 3,14 \cdot 0,895^3 \times 10^{-9} \cdot 140 = 0,42 \cdot 10^{-6}$ кг, тогда количество зерен мелких фракций будет равно $k_m = 0,26/0,42 \cdot 10^{-6} = 619048$. Расчет показывает, что на одно крупное зерно приходится 5,5 мелких зерен. Количество частиц инертного материала определим, исходя

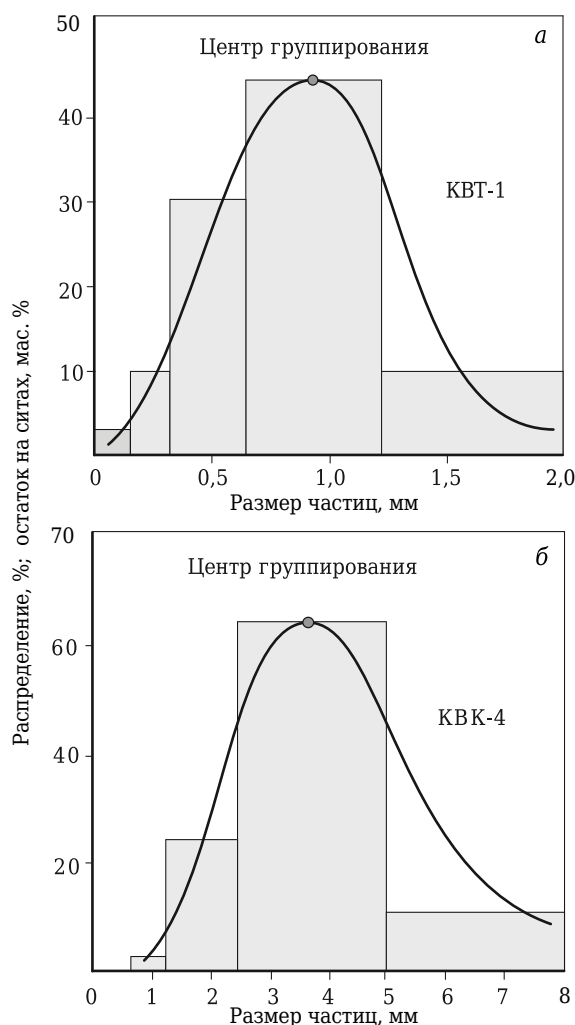


Рис. 3. Кривые распределения татарского КВТ-1 (а) и ковдорского КВК-4 (б) концентратов и гистограммы остатков на ситах в зависимости от размера частиц

из 5 % его содержания, среднего размера частиц 2,0 мм и истинной плотности. Масса одной частицы равна $m = 4/3\pi r^3 \rho_t = 4/3 \cdot 3,14 \cdot 1,0^3 \cdot 10^{-9} \cdot 2300 = 9,6 \cdot 10^{-6}$ кг, тогда количество инертного материала будет равно $k_i = 0,05/9,6 \cdot 10^{-6} = 5208$. На каждую частицу инертного материала приходится около 22 крупных зерен вспученного вермикулита с условным диаметром $D_{св} = 4,2$ мм.

Новая модель теплоусвоения. Опираясь на выражение (1), запишем уравнение баланса энергий при незавершенном теплоусвоении, когда крупные частицы вермикулитового потока при переходе из нижнего электрического модуля в дополнительный «нулевой» модуль остаются недовспученными:

$$Q_{\Sigma} = k_m k_m (Q_x + Q_v + Q_n + Q_r + Q_c) + k_k k_k (Q_x + Q_v + Q_n + Q_r + Q_c) + (1 - k_v)(Q_i + Q_{\phi}), \quad (2)$$

где Q_i — теплота нагрева инертного материала; Q_{ϕ} — теплота испарения физической воды, адсорбированной им, определяемые по формулам [5] $Q_i = 0,955 c_{и} m \Delta T$, $Q_{\phi} = 0,045 c_{по} m$, где 0,955 и 0,045

— весовые доли сухой части и влаги в 1 кг инертного материала; m — масса инертного материала; ΔT — изменение температуры от 100 °С до конечной температуры нагрева; $c_{\text{по}}$ — удельная теплота парообразования ($\sim 2250 \cdot 10^3$ Дж/кг) [5].

Сопутствующими ковдорскому вермикулиту породами являются в основном оливин и пироксен, которые составляют инертный материал (4–6 %). Средняя удельная теплоемкость $c_{\text{и}}$ оливин-пироксена в диапазоне 600–800 °С составляет около 1151 Дж/(кг·°С) [7]. Тогда теплота, поглощаемая 1 кг инертного материала, составит $Q_{\text{и}} = 714,5$ кДж, а энергия фазового перехода адсорбированной воды $Q_{\text{ф}} = 101,3$ кДж.

Выражение (2) отражает энергетический баланс новой модели. Главным ее элементом выступает эксергия зерен, которые ко входу в «нулевой» модуль из-за относительно больших размеров оказались недовоспущенными из-за незавершенной дегидратации глубинных слоев. Если выделить мелкую фракцию и инертный материал из общего потока, то выражение (2) для оставшихся основной и крупной фракций вермикулита примет вид

$$Q'_{\Sigma} = k_{\text{к}} k_{\text{т}} (Q_{\text{х}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{с}}), \quad (3)$$

а дефицит тепла, недостающего их зернам для завершения дегидратации и структурообразования, будет определяться выражением

$$\Delta Q = (1 - k_{\text{т}}) k_{\text{к}} (Q_{\text{х}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{г}}). \quad (4)$$

Но его можно восполнить уже накопленной эксергией, равной

$$k_{\text{т}} k_{\text{к}} Q_{\text{с}} = (1 - k_{\text{т}}) k_{\text{к}} (Q_{\text{х}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{г}}). \quad (5)$$

Из выражения (5), сократив обе части уравнения на $k_{\text{к}}$, путем несложного преобразования можно найти минимальное значение коэффициента $k_{\text{т}}$, при котором эксергия $k_{\text{т}} Q_{\text{с}}$ покроет недо-

стающее для дегидратации и структурообразования материала тепло ΔQ :

$$k_{\text{т}} = (Q_{\text{х}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{г}}) / (Q_{\text{х}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{с}}) = 0,54. \quad (6)$$

Полученное значение показывает, что уровень эксергии в зернах составляет 54 % от всей усвоенной энергии, и этого будет достаточно для восполнения недостающих 46 %. Этот вывод является экстремальным, так как опирается на гипотетическую способность эксергии полностью преобразоваться в энергию механической трансформации. Но достанет ли этой способности для совершения полезной механической работы, в данном случае полноценного и окончательного вспучивания вермикулита?

Рассмотрим временные аспекты энергетических процессов, идущих в дополнительном модуле. Следует учесть время «перетекания» энергии от внешнего источника $3t$ (3 — количество электрических модулей; t — время движения вермикулита по модулю) и дополнительное время движения в «нулевом» модуле $t_{\text{доп}}$, в течение которого эксергия $k_{\text{т}} Q_{\text{с}}$ завершит все процессы. Возьмем за основу трехмодульную опытно-промышленную печь со временем обжига 2,74 с [8]. Разделение процесса теплоусвоения на два этапа с учетом выражений (1), (3) и (5) и с учетом полного перехода эксергии $k_{\text{т}} Q_{\text{с}}$ в энергию структурообразования дает уравнение

$$k_{\text{т}} (Q_{\text{х}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{с}}) \cdot 3t + k_{\text{т}} Q_{\text{с}} t_{\text{доп}} = (Q_{\text{х}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{с}}) \cdot 3t_{\text{м}},$$

решение которого относительно $t_{\text{доп}}$ позволяет найти время, необходимое для восполнения недостающих 46 % тепловой энергии:

$$t_{\text{доп}} = 3t(1 - k_{\text{т}}) (Q_{\text{х}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{г}}) / k_{\text{т}} Q_{\text{с}}. \quad (7)$$

На рис. 4 показана зависимость дополнительного времени от коэффициента $k_{\text{т}}$, построенная по выражению (7). Значение $k_{\text{т}} = 0,54$ показывает границу теплоусвоения, находясь ниже которой восполнить недополученное тепло за счет эксергии $k_{\text{т}} Q_{\text{с}}$ невозможно. Максимальное значение $k_{\text{т}} = 1$ соответствует полному теплоусвоению, когда в печи нет «нулевого» модуля. При $k_{\text{т}} = 0,54$ дополнительное время составляет 8,3 с, но и при столь продолжительном процессе только часть эксергии совершит механическую работу вспучивания, потому что потери неизбежны, как и при всяком преобразовании энергии и потому, что при нагревании глубинных слоев остывают внешние слои и интенсивность «перетекания» теплоты снижается.

Модель температуропроводности. Локализуем область возможных значений $k_{\text{т}}$ на кривой, показанной на рис. 5, «сжимая» указанный интервал. Сначала будем исходить из инженерных соображений.

При времени 8 с высота наиболее компактного («ломаного») «нулевого» модуля [9] превысит

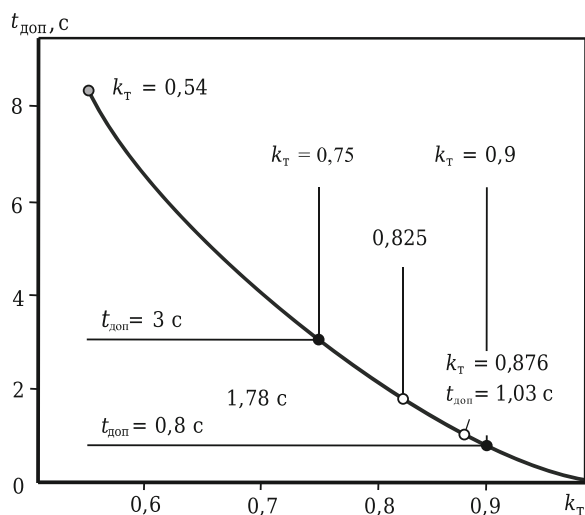


Рис. 4. Зависимость дополнительного времени $t_{\text{доп}}$ от коэффициента полноты теплоусвоения $k_{\text{т}}$

высоту печи, поэтому максимальное время ограничим тремя секундами, повысив вероятность полного перехода эксергии в энергию структурообразования зерен. Если k_t принять больше 0,9, то снижение температуры в электрических модулях и снижение потребляемой мощности будут незначительными. Так, на рис. 4 определен новый диапазон $k_t = 0,75 \div 0,9$ со средним значением 0,825 и соответствующим ему $t_{\text{доп}} = 1,78$ с.

Следующий подход, дающий подсказку о времени распространения температуры от периферии вермикулитовых зерен к центру, основан на понятии температуропроводности вещества χ , характеризующей скорость выравнивания температуры в неравновесных тепловых процессах. Даже частично вспученный вермикулит обладает выраженной анизотропией свойств. Чешуйки чередуются со щелевыми порами, поэтому модель температуропроводности не учитывает тепловой поток в поперечном направлении зерна. Это как пачка листового металла, температуропроводность которой вдоль листов кратно превышает поперечную температуропроводность, хотя здесь толщина листа намного больше величины зазоров.

Выделим из «пачки» вермикулитового зерна одну чешуйку с условным диаметром $D_{\text{св}}$ (см. рис. 5), и рассчитаем время распространения температуры от ее периферии к центру. Сделаем следующие допущения к модели температуропроводности: температуропроводность в любой точке чешуйки одинакова; конечная температура на периферии (720 °C) возникла мгновенно и остается неизменной; температура в центре достигает значения, при котором все тепловые процессы завершаются; в соседних чешуйках идут аналогичные процессы, поэтому теплообмена между ними нет; ни источника, ни стока тепла в глубине зерна нет.

Выделим фрагмент чешуйки толщиной δ (см. рис. 5). Зависимость отношения перепада температур ΔT_1 на периферии чешуйки и в ее центре в конце нагрева (на выходе из «нулевого» модуля) и в начале нагрева ΔT_2 (на входе в него) от времени τ описывается уравнением [10]

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{T_{\text{п.к}} - T_{\text{ц.к}}}{T_{\text{п.н}} - T_{\text{ц.н}}} = 1,03e^{-2,47 \frac{\chi \tau}{\delta^2}}, \quad (8)$$

где $T_{\text{п.к}}$ — температура на периферии в конце нагрева, °C; $T_{\text{ц.к}}$ — температура в центре в конце нагрева, °C; $T_{\text{п.н}}$ — температура на периферии в начале нагрева, °C; $T_{\text{ц.н}}$ — температура в центре в начале нагрева, °C; χ — температуропроводность, м²/с.

Применимость этой формулы при толщине фрагмента δ оценивается условием [10]

$$\chi \tau / \delta^2 > 0,06, \quad (9)$$

где τ неизвестно, но «ожидаемое» значение τ_0 можно найти для случая, когда температура на концах (в данном случае нашего фрагмента) не

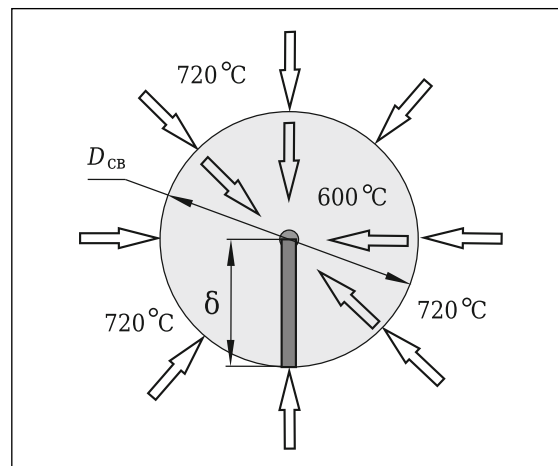


Рис. 5. Визуализация модели температуропроводности чешуйки зерна диаметром $D_{\text{св}}$ с постоянной периферийной температурой

влияет на время их выравнивания [11] $\tau_0 = \delta^2 / \chi$. Для зерна со средневзвешенным диаметром 4,2 мм δ равна $2,1 \cdot 10^{-3}$ м, $\chi = 2,9 \cdot 10^{-6}$ м²/с (расчет χ приведен ниже), а «ожидаемое время» τ_0 равно 1,52 с. Проверка условия (9) при этом значении τ показывает, что оно выполняется: $0,986 > 0,06$.

Вернемся к выражению (8). Убавим штатную температуру нагревателей печи от 750 до 720 °C и зададимся тремя константами: пусть к моменту входа зерна в «нулевой» модуль $T_{\text{п.к}}$ равна 720 °C; пусть $T_{\text{ц.н}}$ останется равной температуре предварительного нагрева 100 °C; пусть в глубине зерен к моменту выхода из «нулевого» модуля температура $T_{\text{п.к}}$, при которой все тепловые процессы завершаются, равна 600 °C. Тогда левая часть выражения (8) будет равна 0,194.

Определим значение температуропроводности [11]:

$$\chi = \lambda / \rho c, \quad (10)$$

где λ — теплопроводность вермикулитовой чешуйки; ρ — ее истинная плотность; c — удельная теплоемкость.

Значений параметров, характеризующих свойства чешуйки частично вспученного зерна, в источниках информации нет, потому будем исходить из следующего. Пористость зерен определяется щелевыми порами между чешуйками, а «тело» чешуйки является сплошным и λ для нее можно принять, как для вермикулита и флогопита-сырца, равным в направлении плоскостей спайности $\sim 5,1$ Вт/(м·°C) [12]. Плотность по этим же соображениям принимаем равной 2300 кг/м³ [13], но с учетом выхода большей части гидратной воды (~ 18 % [5]), уточненное значение ρ будет равно 1886 кг/м³. Удельная теплоемкость с слюды-сырца при 20 °C около 860 Дж/(кг·°C) [14]. По аналогии с другими минералами той же плотности в интервале от 20 до 800 °C величину c можно принять равной около 930 Дж/(кг·°C) [14].

Расчет по формуле (10) дает для чешуйки значение $\chi = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Запишем уравнение (8) в виде

$$0,194 = 1,03e^{-2,47\frac{\chi\tau}{\delta^2}}.$$

После несложной последовательности преобразований получим

$$e^{2,47\frac{\chi\tau}{\delta^2}} = 5,32. \quad (11)$$

Степень основания натурального логарифма $2,47\frac{\chi\tau}{\delta^2}$, чтобы удовлетворить условию (11), должна быть равна 1,673. Поэтому

$$2,47\frac{\chi\tau}{\delta^2} = 1,673. \quad (12)$$

Из выражения (12) получаем

$$\tau = 0,677\frac{\delta^2}{\chi}. \quad (13)$$

Чтобы найти время выравнивания температуры до 600°C в центре чешуйки зерна из КВК-4, нужно принять $\delta = 0,5 D_{\text{св}}$. Искомое время при $D_{\text{св}} = 4,2 \text{ мм}$, рассчитанное по формуле (13), равно $1,03 \text{ с}$; ему соответствует значение $k_\tau = 0,876$. Для $D_{\text{св}}$ зерен мелких фракций структурообразование согласно новой модели завершилось до входа в «нулевой» модуль и их температуры $T_{\text{п.к}}$ и $T_{\text{ц.к}}$ равны 720°C , а тепловая энергия при входе в дополнительный модуль в соответствии с уравнением (2) равна

$$Q_m = k_m Q_c, \quad (14)$$

но эксергией она не является, так как не может влиять на механическую трансформацию крупных зерен. Q_m , согласно второму допущению к модели теплопроводности, обеспечивает неизменность температуры 720°C на периферии крупных зерен, замещая ту часть их эксергии, которая «перетекает» вглубь, повышая $T_{\text{ц.к}}$ до принятых 600°C . Но этот ее потенциал все же требует более подробного рассмотрения и обоснования.

Доказать, что мелкий материал нагревается быстрее, несложно. По формуле (13) определим время выравнивания температуры для мелкого зерна со средневзвешенным диаметром $1,79 \text{ мм}$: $0,187 \text{ с}$ против $1,03 \text{ с}$. Время выравнивания температуры мелких зерен в $5,5$ раза меньше, чем крупных. Но в общем массиве есть еще

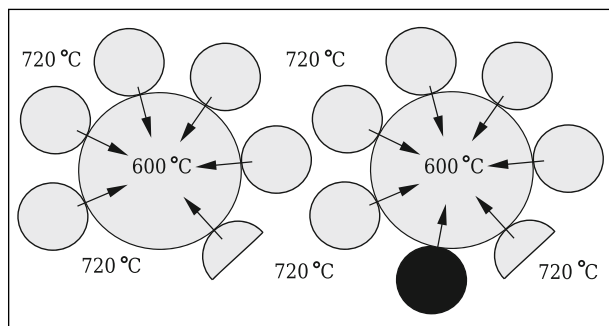


Рис. 6. Кластеры вокруг крупных зерен

инертный материал с запасенной энергией: $Q_{\text{ин}} = (1 - k_b)(Q_{\text{и}} + Q_{\text{ф}})$. О скорости его нагрева можно судить по отношению коэффициентов теплопроводности χ_o и вермикулита χ_b :

$$\chi_o / \chi_b = \lambda_o \rho_{\text{т}} c_b / \lambda_b \rho_o c_{\text{и}}. \quad (15)$$

Истинная плотность оливин-пироксеновых компонентов ρ_o составляет около 2300 кг/м^3 , средняя теплопроводность λ_o в диапазоне температур $600\text{--}800^\circ\text{C}$ около $4,81 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$, а удельная теплоемкость c_o определена выше и составляет около $1151 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{C)}$. Теплопроводность λ_b вспученного вермикулита около $0,056 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ [5], его насыпная плотность ρ_b для исходного концентрата КВК-4 в среднем около 90 кг/м^3 , а плотность зерна «в теле» $\rho_{\text{т}}$ около 140 кг/м^3 . Удельная теплоемкость вспученного вермикулита $c_b = 552 \cdot 10^3 / 620 = 890,3$, где $552 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{C)}$ — теплота Q_c , идущая на нагрев «сухой» части минерала; 620°C — изменение температуры с учетом температурной подготовки от 100 до 720°C . Расчет по формуле (15) дает отношение χ_o / χ_b , равное $7,6$, следовательно, инертный материал будет нагрет до конечной температуры еще на верхних электрических модулях печи. Это неудивительно, ведь он не вспучивается и не термоизолирует себя, как вермикулит.

Выше было показано, что на одно крупное зерно приходится $5,5$ мелких зерен, а на одну частицу инертного материала — 22 крупных зерна. Если расположить их на плоскости в виде кластеров, то выглядит это так, как показано на рис. 6. Из-за точечного контакта кондуктивный перенос тепла от мелких зерен и инертных частиц не идет, поэтому мы не рассматриваем его как эксергию. Но лучистая энергия поддерживает температуру на поверхности больших зерен. Таково допущение модели теплопроводности. Однако для этого зерна должны находиться в непосредственной близости друг к другу.

Определим запас энергии в мелких фракциях вермикулита и инертном материале. Теплота, усвоенная инертным материалом, в расчете на 1 кг массы равна $Q_{\text{и}} = 714,5 \text{ кДж}$. С учетом члена $(1 - k_b)$ в выражении (2), учитывая его массовую долю ($\sim 5\%$), определим потенциал инертного материала к моменту входа в «нулевой» модуль: $0,05 Q_{\text{и}} = 35,7 \text{ кДж}$. Тепловая энергия мелких фракций вермикулита, вносимая в «нулевой» модуль, определяется равенством (14). При среднем значении долевого коэффициента $k_{\text{м.ср}} = 0,275$ энергия Q_m будет равна $0,275 \cdot 552 = 151,8 \text{ кДж}$.

В сумме тепловой источник из инертного материала и мелких зерен вермикулита, потенциально способный поддерживать температуру поверхности крупных зерен в «нулевом» модуле, имеет запас энергии $187,5 \text{ кДж}$. При минимальном значении $k_\tau = 0,54$ накопленная эксергия теоретически способна покрыть дефицит тепла, необходимого для завершения структурообразования: $\Delta Q = (1 - k_\tau)k_{\text{к.ср}}(Q_{\text{х}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{т}}) = 0,46 \cdot 0,275 \cdot 657 = 219,1 \text{ кДж}$.

Однако поиск оптимума коэффициента полноты теплоусвоения привел ко времени выравнивания 1,03 с и определил значение его $k_t = 0,876$. При этом значении уровень эксергии, с высокой вероятностью способной покрыть дефицит тепла и полностью преобразоваться в энергию структурообразования, завершив процесс теплоусвоения, будет равен $\Delta Q = (1 - k_{t,cr}) k_{k,cr} (Q_x + Q_b + Q_n + Q_r) = 0,124 \cdot 0,876 \cdot 657 = 71,4$ кДж.

Как видим, источник энергии в виде инертного материала и мелких зерен вермикулита имеет запас энергии (187,5 кДж) в 2,6 раза больше. Это указывает на высокую вероятность того, что в реальном процессе инертный материал и мелкая фракция вермикулита потенциально способны поддерживать температуру 720 °С на поверхности крупных зерен. Снижение температуры нагревателей T в соответствии с формулой

$$3 \frac{IU}{f} = \sigma T^4 \quad (16)$$

(где σ — постоянная Стефана – Больцмана, $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт / (м²·К⁴); U — линейное напряжение сети, 220 В) приведет к снижению силы тока I и уменьшению потребляемой мощности, равной $N_n = 3IU$. (17)

Решая совместно равенства (16) и (17), получим: $N_n = \sigma T^4 f$. (18)

Библиографический список

1. Пат. 47082, Российская Федерация, МПК⁷ F 27 B 15/00. Технологический комплекс и печь для обжига вермикулита / Нижегородов А. И., Залогов А. И.; заявитель и патентообладатель А. И. Нижегородов, г. Иркутск. — № 2005108234; заявл. 23.03.2005; опубл. 10.08.2005, Бюл. № 22.
2. Пат. 85993, Российская Федерация, МПК F 27 B 15/00. Печь для обжига вермикулита / Нижегородов А. И.; заявитель и патентообладатель А. И. Нижегородов, г. Иркутск. — № 2009114125/22; заявл. 14.04.2009; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23.
3. Пат. 128706, Российская Федерация, МПК F 27 B 15/14. Электрическая печь для обжига вермикулита / Нижегородов А. И., Зедгенизов В. Г.; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный технический университет (ФГБОУ ВПО ИРГТУ), г. Иркутск. — № 2012154758/02; заявл. 17.12.2012; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 15.
4. Пат. 146731, Российская Федерация, МПК F 27 B 9/06. Электрическая печь для обжига вермикулитовых концентратов / Нижегородов А. И.; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный технический университет (ФГБОУ ВПО ИРГТУ), г. Иркутск. — № 2009114125/22; заявл. 14.04.2009; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23.
5. Нижегородов, А. И. Технологии и оборудование для переработки вермикулита: оптимальное фракционирование, электрический обжиг, дообогащение / А. И. Нижегородов. — Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 2011. — 172 с.
6. Нижегородов, А. И. Совершенствование технологии обжига вермикулита в электрических модульно-спусковых печах / А. И. Нижегородов // Строительные материалы: technology. — 2011. — № 5. — С. 62–64.

Для принятого аналога [8] площадь поверхностей f нагревателей печи равна 1,66 м². Потребляемая мощность при 750 °С по формуле (18) равна 103,1 кВт, а при сниженной до 720 °С 91,5 кВт. Очевидно, что снижение мощности и удельной энергоемкости составит 11,25 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

И новая модель теплоусвоения, и модель температуропроводности указывают на возможный перенос тепловых процессов в вермикулитовых зернах для их завершения в добавочный «нулевой» модуль. Однако точного значения коэффициента полноты теплоусвоения k_t и гарантии, что энергии инертного материала и мелких зерен вермикулита будет достаточно для завершения структурообразования вермикулитовых зерен, они все же не дают. Для подтверждения полученных результатов нужна экспериментальная проверка.

Весной 2015 г. была изготовлена опытная печь с неэлектрифицированным «нулевым» модулем, а летом проведены ее испытания и экспериментальные исследования. Полученные результаты не только ответили на все вопросы, оставшиеся в теории не до конца ясными, но и подсказали новые технические решения на пути совершенствования электрических модульно-спусковых печей. Они будут подробно рассмотрены в следующей статье.

7. Тепловые свойства минералов и горных пород [электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://poroda.puknu.ru/html/pattern%204.html> (31. 01. 2016).

8. Нижегородов, А. И. Третье поколение электрических модульно-спусковых печей для обжига вермикулитовых концентратов серии ПЭМС / А. И. Нижегородов // Строительные материалы : technology. — 2008. — № 10. — С. 84, 85.

9. 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.

10. Расчет времени для выравнивания температуры. Вунивер.ру. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://vunivere.ru/work27956/page2> (31.01.2016).

11. Китайгородский, А. И. Введение в физику / А. И. Китайгородский. — М. : Наука, 1973. — 688 с.

12. Энциклопедия по машиностроению XXL. Оборудование, материаловедение, механика. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://mash-xxl.info/info/452250/> (31.01.2016).

13. Слюда. Сравнительные свойства природных и синтетических слюд. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://cniga.com.ua/index.files/sluda.htm> (31. 01. 2016).

14. Методические рекомендации по применению классификации запасов к месторождениям слюды. — Министрство природных ресурсов РФ. — М., 2005. — 41 с. ■

Получено 16.03.16

© А. И. Нижегородов, А. В. Звездин, 2016 г.