

А. В. Звездин, Т. Б. Брянских, д. т. н. А. И. Нижегородов (✉)

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет», г. Иркутск, Россия

УДК 622.367.8:66.042.27

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОГЛОЩАТЕЛЬНО-ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ВЕРМИКУЛИТА В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрен способ определения поглотительно-отражательной способности единичного вермикулитового зерна и плотного однослойного массива вспучивающегося вермикулита, находящегося на плоскости в условиях теплового излучения. На основе экспериментального графика дегидратации весь процесс обжига и механической трансформации вермикулита разбивается на стадии. Для каждой стадии авторы определяют усредненные показатели отражательной и поглотительной способности, исходя из идеализированного представления о том, что боковые стороны зерен благодаря чешуйчатой структуре полностью поглощают лучистую энергию нагревательных элементов, а торцевые — полностью ее отражают. Исходя из средневзвешенных значений оптических свойств зерна и массива в целом на всем периоде термообработки, построена конечная статичная оптическая модель массива.

**Ключевые слова:** вермикулит, поглотительно-отражательная способность, степень черноты, статичная оптическая модель вермикулитового потока.

### ВВЕДЕНИЕ

Большинство минералов даже при значительном нагреве морфологически стабильны: изменяются некоторые физические свойства, но не внешний вид. Вермикулит с этой точки зрения является уникальным объектом. Поглощая тепловую энергию при температуре излучателей 500–800 °С, он трансформируется не только по размерам и форме, но по структуре и свойствам так сильно, как ни один другой минерал. Очевидно, что эта трансформация влечет за собой весьма существенное изменение оптических свойств — поглотительной ( $\alpha$ ), отражательной ( $\rho$ ), излучательной ( $\epsilon$ ) и пропускательной ( $\tau$ ) способности как в видимом, так и в инфракрасном диапазоне длин волн. Обзор более чем двухсот источников информации в период с 2007 по 2016 г., посвященных исследованиям вермикулита, направленный на поиск экспериментальных значений показателей  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $\epsilon$  и  $\tau$ , не дал результатов: таких данных нет. Это указывает на то, что, по-видимому, никто не ставил подобных экспериментов.

Но можно ли вообще поставить эксперимент, в котором указанные оптические характеристики будут непосредственно определены? Следует учесть, что их значения нужно установить для весьма узкого диапазона длин волн теплового излучения 0,78–40 мкм [1], поэтому зада-

ча представляется довольно сложной. Но надо учесть и то, что процесс полной трансформации вермикулита от плоских частиц до вспученных, многократно увеличившихся в размерах зерен чешуйчатой структуры в указанном выше температурном диапазоне длится 1,8–4 с [2, 3]. За это время все физические, в том числе и оптические, свойства непрерывно и быстро изменяются, поэтому задача становится практически невыполнимой. Конечно, изучение оптических свойств вермикулита различных месторождений проводилось, но в этих экспериментах путем анализа спектров поглощения определялся химический состав минерала [4, 5].

Цель работы — получение статичной аналитической модели, описывающей поглотительно-отражательную способность однослойного массива вспучивающегося вермикулита в условиях теплового излучения. Ниже будет показано, что все-таки возможен простой статистический эксперимент, результаты которого будут способствовать созданию искомой аналитической модели.

### МОДЕЛЬ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЕДИНИЧНОГО ЗЕРНА

Процесс механической трансформации плоских частиц в объемные вспученные зерна со сложной чешуйчатой структурой, происходящий в режиме термоудара, вызываемого дегидратацией химически связанной воды (до 20 % массы исходного минерала), можно примерно распределить по стадиям. Для этого потребуется экспериментальная кривая дегидратации верми-



А. И. Нижегородов  
E-mail: nastromo\_irkutsk@mail.ru

кулита, многократно полученная не только при проведении опытов, но и в производственных условиях на электрических модульно-спусковых печах различных модификаций (рис. 1) для разных видов концентратов [6, 7]. На рис. 2 показан график изменения относительной насыпной плотности вермикулита, определяемой отношением  $\rho_0 = \rho_n / \rho_k$ , от времени прохождения частиц по модулям печи  $t$  ( $\rho_n$  — начальная насыпная плотность вермикулитового концентрата, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_k$  — конечная насыпная плотность вспученного минерала, кг/м<sup>3</sup>). Графики построены по результатам измерений  $\rho_n$  и  $\rho_k$  вермикулита Ковдорского месторождения марок КВК-1, КВК-2

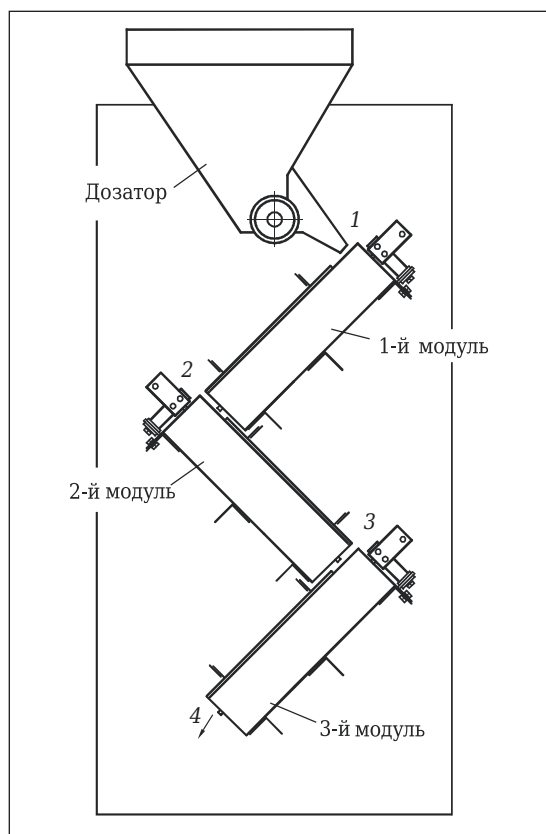


Рис. 1. Электрическая трехмодульная печь; цифрами показаны зоны пересыпания

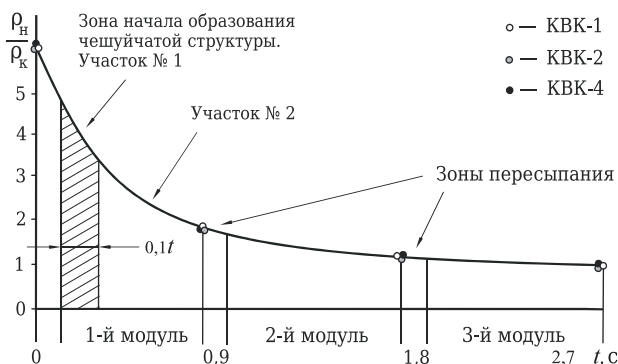


Рис. 2. Кривая дегидратации вермикулита Ковдорского месторождения при его движении по модулям печи

и КВК-3 (концентрат вермикулитовый ковдорский; цифра обозначает размерность частиц концентрата, мм [8]). Для концентратов Татарского и Кокшаровского месторождений [9, 10] кривые дегидратации укладываются практически в одну линию, поэтому кривую дегидратации можно считать универсальной [6].

Наиболее интенсивно вермикулит поглощает тепловую энергию на 1-м модуле: об этом можно судить по изменению относительной плотности  $\rho_0$  — от 6 до 2. Это первая стадия, в ней можно выделить еще один участок предварительного нагрева. По визуальным наблюдениям через открытые торцы модулей обжига работающей печи, время движения на этом коротком участке составляет примерно  $0,1t$  ( $t$  — полное время прохождения вермикулита в модулях печи). Здесь частицы вермикулита в основном еще сохраняют плоскую форму и обладают максимальной поглощательной способностью. За ним начинается процесс механической трансформации частиц и образования чешуйчатой структуры. Так, на выходе из 1-го модуля при  $\rho_0 \sim 2$  пробы, взятые из зоны пересыпания 2 на 2-й модуль (см. рис. 1), показывают ярко выраженное чешуйчатое строение зерен (рис. 3). Но они еще короткие, а в глубине зерен хорошо видны темные «холодные» зоны, указывающие на то, что дегидратация в них еще не произошла. На второй стадии при изменении  $\rho_0$  от 2 до 1,15 процессы структурообразования замедляются. Здесь зерна частично вспучены и сами термоизолируют себя. Кроме того, в них уже накопилась значительная поглощенная теплота, и сами зерна не только поглощают и отражают лучистую энергию, но и излучают ее. Третья стадия заключительная;  $\rho_0$  уменьшается всего на 0,15 единицы, и из 3-го модуля зерна вермикулита выходят полностью вспученные (рис. 4). Торцевые части зерен, которые по форме соответствуют исходным плоским частицам

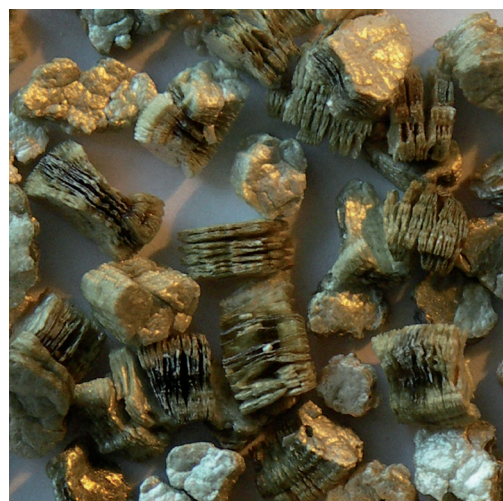


Рис. 3. Вермикулит в пробе, взятой в зоне пересыпания 2 (фрагмент фотографии)

концентрата, обладают золотистым цветом и хорошо блестят, что указывает на очень высокую отражательную способность в видимом световом диапазоне волн. Боковые стороны имеют бледно-желтый, белесый оттенок и выглядят матовыми. Их отражательная способность не столь ярко выражена.

Рассмотрим вспученное зерно на схеме, показанной на рис. 5. Идеализируя аналитическую модель поглотительно-отражательной способности зерна, сделаем следующие допущения:

1. Размеры всех одиночных зерен  $l_{00}$  и  $l_0$  равны.
2. Торцевые поверхности (площади)  $f_0$  на участке движения до  $0,1t$  в первой стадии не пропускают и не отражают падающие потоки теплового излучения  $Q_n$  и обладают только поглотительной способностью ( $\rho = 0, \alpha = 1, \tau = 0$ ).

3. Торцевые поверхности  $f_0$  на втором участке движения  $> 0,1t$  в первой стадии не пропускают и не поглощают падающие потоки  $Q_n$  и обладают только отражательной способностью ( $\rho = 1, \alpha = 0, \tau = 0$ ).

4. Боковая поверхность  $f_{00}$  на участке движения  $> 0,1t$  в первой стадии и в двух последующих не пропускают и не отражают падающие потоки теплового излучения  $Q_n$  и обладают только поглотительной способностью ( $\rho = 0, \alpha = 1, \tau = 0$ ).

5. Значения оптических показателей единичного зерна в процессе теплового воздействия изменяются ступенчато на участках первой стадии и от стадии к стадии.

Допущение 2 основано на особо высокой поглотительной способности в тепловом диапазоне, что подтверждается очень быстрым изменением  $\rho_0$  на участке № 1 (см. рис. 2). Допущение 3 основано на предположении, что при частично вспученном состоянии торцевые поверхности зерен, обладающие золотистым цветом, сильно блестят, что указывает на весьма высокую отражательную способность в видимом световом диапазоне волн. Допущение 4 основано на гипотезе о том, что при проникновении лучистой энергии вглубь зерен через тонкие щели между чешуйками вся она будет усвоена зерном по аналогии с моделью абсолютно черного тела, принятой в физике [11]. В общем виде аналитическая модель поглотительно-отражательной способности единичного зерна вермикулита имеет вид

$$\alpha + \rho + \tau = 1.$$

Рассмотрим изменение оптических показателей по стадиям, учитывая, что первая стадия разделена на два участка.

*Первая стадия, участок № 1 ( $0,1t$ )* (см. рис. 1). Форма частицы исходная — плоская, отношение размеров  $l_{00} / l_0 \approx 0,1$ . Поглощение полное ( $\alpha = 1$ ), формула модели

$$1 + 0 + 0 = 1. \quad (1)$$



Рис. 4. Полностью вспученный вермикулит (фрагмент фотографии)

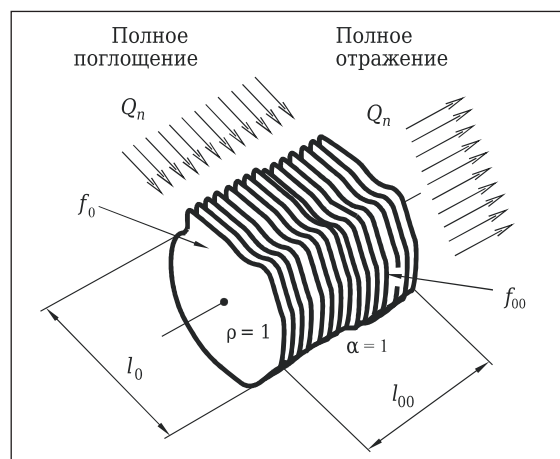


Рис. 5. Схема к модели поглотительно-отражательной способности вермикулитовых зерен

*Первая стадия, участок № 2 до зоны пересыпания 2.* Пробы из 2-й зоны пересыпания (см. рис. 3) показывают  $l_{00} / l_0 \approx 1$ . Среднее отношение размеров на участке № 2  $l_{00} / l_0 \approx (0,1 + 1) = 0,55$ , соотношение площадей

$$\frac{f_{00}}{2 \cdot f_0} = \frac{\pi l_0 \cdot 0,55 l_0}{2 \cdot 0,25 \pi l_0^2} = 1,1.$$

Отношение площадей равно отношению поглотительной способности к отражательной, а их сумма равна единице. Решая систему уравнений

$$\alpha / \rho = 1,1 \text{ и } \alpha + \rho = 1, \quad (2)$$

находим формулу модели на участке № 2 первой стадии:

$$0,524 + 0,476 + 0 = 1. \quad (3)$$

*Вторая стадия, участок между зонами пересыпания 2 и 3.* Соотношение размеров при переходе во вторую стадию  $l_{00} / l_0 = 1$ . В конце третьей стадии это соотношение достигает 1–3 (см. рис. 4) при среднем значении 2. Тогда в зоне



пересыпания  $3 l_{00} / l_0 = 1,5$ , а среднее отношение  $l_{00} / l_0$  на второй стадии будет равно  $(1 + 1,5) / 2 = 1,25$ . Соотношение площадей

$$\frac{f_{00}}{2 \cdot f_0} = \frac{\pi l_0 \cdot 1,25 l_0}{2 \cdot 0,25 \pi l_0^2} = 2,5.$$

Тогда система уравнений (2) изменится:

$$\alpha / \rho = 2,5 \text{ и } \alpha + \rho = 1,$$

а формулу модели на второй стадии можно будет представить равенством

$$0,714 + 0,286 + 0 = 1. \quad (4)$$

На третьей стадии  $l_{00} / l_0 = (1,5 + 2) = 1,75$ , а соотношение площадей

$$\frac{f_{00}}{2 \cdot f_0} = \frac{\pi l_0 \cdot 1,75 l_0}{2 \cdot 0,25 \pi l_0^2} = 3,5.$$

По аналогии со второй стадией формула модели представлена суммой

$$0,778 + 0,222 + 0 = 1. \quad (5)$$

Поскольку конечной задачей исследования является создание статичной модели поглощательно-отражательной способности однослойного вермикулитового массива как некой усредненной константы, то будет достаточно найти средневзвешенное значение показателей поглощения и отражения на всем временном интервале  $t$ :

$$\alpha_c = \frac{0,1 \cdot 1 + 0,8 \cdot 0,524 + 0,9 \cdot 0,714 + 0,9 \cdot 0,778}{0,1 + 0,8 + 0,9 + 0,9} = 0,69,$$

$$\rho_c = \frac{0,8 \cdot 0,476 + 0,9 \cdot 0,286 + 0,9 \cdot 0,222}{0,1 + 0,8 + 0,9 + 0,9} = 0,31.$$

В данном случае для трехмодульной печи, на которой были получены графики дегидратации вермикулита (см. рис. 2), временной интервал  $t$  (сумма в знаменателе) равен 2,7 с [12]. Полученная аналитическая модель единичного вермикулитового зерна задана формулой

$$\alpha_c + \rho_c + \tau_c = 0,69 + 0,31 + 0 = 1, \quad (6)$$

которая может быть использована для математического моделирования процессов тепло-

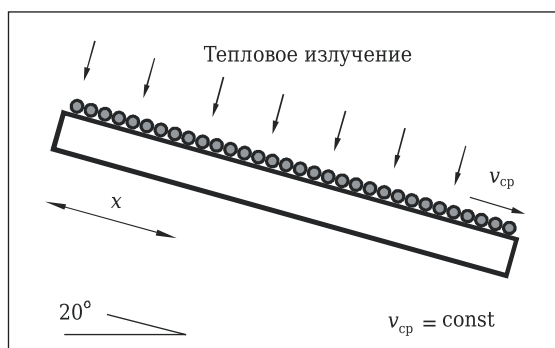


Рис. 6. Схема вибрационного перемещения сырья в печи с подвижной подовой платформой

усвоения вермикулита и теплопереноса в рабочих камерах модулей обжига электрических модульно-спусковых печей [6], но уже с учетом отражательной способности (ранее зерно принималось за абсолютно черное тело). В таких печах отсутствует сплошной плотный поток, зерна движутся за счет сил тяжести ускоренно, удаляясь друг от друга, и, обладая шестью степенями свободы, со всех сторон облучаются потоками теплового излучения.

При движении по поверхности вибрирующей подовой платформы печи со средней скоростью  $v_{ср}$  (рис. 6) и определенном соотношении параметров вибрации, наклона платформы, крупности материала, подачи дозатора и температуры на поверхности нагревательных элементов вспучивающиеся зерна образуют сплошной плотный однослойный поток. Модель такого массива будет существенно отличаться от модели единичного зерна.

Рассмотрим некоторые результаты проведенных наблюдений и расчетов.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Исходя из того, что в принятых выше допущениях боковые поверхности абсолютно черные, а торцевые полностью отражают лучистую энергию, эксперимент должен был ответить на вопрос, как распределятся зерна на пробнике в виде плоской поверхности на выходе из нижнего модуля электрической модульно-спусковой печи и на поверхности подвижной подовой платформы, совершающей колебания в собственной плоскости? Сколько зерен будет стоять на торце, а сколько лежать на боку? Если все зерна окажутся на боку, то в соответствии с допущением 4 по аналитической модели для одного зерна однослойный массив вспучивающегося вермикулита на поверхности платформы будет обладать только поглощательной способностью.

Первый эксперимент был проведен на концентрате Кокшаровского месторождения размерной группой 4 мм на модульно-спусковой печи, работающей в ООО «Иркутский вермикулит». Плоский пробник располагался под нижним модулем в зоне пересыпания 4 (см. рис. 1), и медленно продвигался так, чтобы выпадающие зерна укладывались на нем в один слой и практически без зазоров между ними. Затем с помощью тонкостенного металлического цилиндра

Таблица 1. Результаты первого эксперимента

Номер опыта	Количество зерен на боку	Количество зерен на торце
1	115	31
2	122	17
3	133	19
Среднее значение	370	67

диаметром 52 мм из массива вычленили три фрагмента и подсчитывали количество зерен, лежащих на боку и стоящих на торце. В табл. 1 приведены полученные результаты.

Поглощательная и отражательная способности однослойного вермикулитового массива на плоскости определяются простыми отношениями:

$$\alpha_m = 370 / (370 + 67) = 0,85,$$

$$\rho_m = 67 / (370 + 67) = 0,15.$$

Расчеты показывают, что поглощательная способность массива на плоскости возрастает по сравнению с единичным зерном на 23,2 % только за счет ориентированности зерен к положению на боку. Поломка зерен и уменьшение размера  $l_{00}$  при движении в печи хотя и происходит, все же подавляющее большинство зерен в массиве располагаются лежа.

Второй эксперимент проводили на вспученном кокшаровском вермикулите той же размерной группы. На рис. 7 показан опытный образец электрической печи с вибрационной подовой платформой без нагревательной системы. На подпружиненную платформу, возбуждаемую эксцентриковым приводом и совершающую колебания в собственной плоскости так, что зерна вермикулита при движении не отрывались от поверхности, подавали вспученный материал с пробника, взятый на выходе из модульно-спусковой печи. После остановки платформы с ее поверхности с помощью тонкостенного металлического цилиндра, как и в первом эксперименте, в произвольно выбранных местах вычленили три фрагмента и подсчитывали количество лежащих и стоящих зерен. В табл. 2 приведены полученные результаты.

В этом случае поглощательная способность несколько увеличилась, а отражательная снизилась, что, по-видимому, указывает на влияние колебаний, под действием которых часть стоящих зерен упадет:

$$\alpha_m = 408 / (408 + 64) = 0,864,$$

$$\rho_m = 64 / (408 + 64) = 0,136.$$

Если в первом эксперименте результаты были получены для полностью вспученных зерен, то здесь, чтобы определить осредненные оптические показатели, следует учесть их распределение по стадиям.

Таблица 2. Результаты второго эксперимента

Номер опыта	Количество зерен на боку	Количество зерен на торце
1	121	24
2	150	32
3	137	8
Среднее значение	408	64

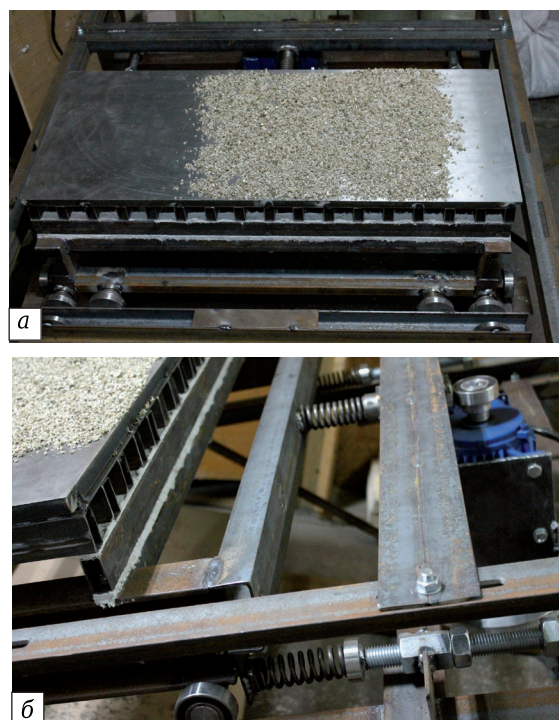


Рис. 7. Вибрационная подовая платформа печи без электронагревательной системы (а, б)

## МОДЕЛЬ ОДНОСЛОЙНОГО ВЕРМИКУЛИТОВОГО МАССИВА

Для модели плотного однослойного вермикулитового массива, движущегося по поверхности наклонной подовой платформы печи, сделаем следующие допущения:

- массив имеет регулярную структуру расположения зерен на поверхности платформы, при которой пустоты между более крупными зернами заполнены зернами менее крупными;
- регулярная структура зерен по мере их движения не нарушается;
- благодаря сплошности потока вспучивающихся зерен тепловое излучение не проникает через их массив и не достигает поверхности платформы;
- нагрев платформы обеспечивается не потоком лучистой энергии, а кондуктивным переносом теплоты от нагревающегося вермикулита.

На участке № 1 (0,1t) первой стадии плоские частицы вермикулита обладают абсолютной поглощающей способностью,  $\alpha = 1$ . На участке № 2 первой стадии из-за соотношения размеров  $l_{00} / l_0 \approx 1$  положения зерен на боку и на торце равновероятны, поэтому оптические показатели массива примерно равны поглощательной и отражательной способностям единичного зерна:  $\alpha = 0,524$  и  $\rho = 0,476$ .

На второй и третьей стадиях  $l_{00} / l_0$  равны 1,25 и 2, вероятность положения зерен на боку достигает максимума, поэтому статичная аналитическая модель поглощательно-отражательной

способности однослойного вермикулитового массива может быть описана показателями  $\alpha_m$  и  $\rho_m$ , определенными как средневзвешенные значения на временном интервале  $t$ :

$$\alpha_c = \frac{0,1 \cdot 1 + 0,8 \cdot 0,524 + 0,9 \cdot 0,864 + 0,9 \cdot 0,864}{0,1 + 0,8 + 0,9 + 0,9} = 0,768,$$

$$\rho_c = \frac{0,8 \cdot 0,476 + 0,9 \cdot 0,136 + 0,9 \cdot 0,136}{0,1 + 0,8 + 0,9 + 0,9} = 0,232.$$

Здесь поглощательная способность массива возрастает по сравнению с единичным зерном на 11,3 %, что тоже весьма существенно и требует принятия во внимание при математическом моделировании процессов теплоусвоения вермикулита и теплопереноса в камерах модулей электрических печей с вибрационной подовой платформой.

Итак, статичная аналитическая модель плотного однослойного вермикулитового потока может быть описана формулой

$$\alpha_m + \rho_m + \tau_m = 0,768 + 0,232 + 0 = 1. \quad (7)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новизна проведенного исследования состоит в получении аналитической модели единичного вермикулитового зерна, представленной выражением (6). Полученный результат может внести уточнение в более раннюю модель вермикули-

тового потока (для модульно-спусковых печей) в виде сплошного анизотропного тела, оптические свойства которого выражались формулой  $\alpha^{xy} + \tau^{xy} = 1$  [6], в которой учитывались только его поглощательная и пропускательная способности по направлениям  $x$  и  $y$ . Даже упрощенная модель, не учитывавшая отражательную способность, давала хорошую сходимость результатов расчета уравнений энергетического баланса системы печь – среда (до 15 %) при их сопоставлении с результатами экспериментов [6].

Теперь эту модель можно представить в новом виде:  $\alpha^{xy} + \rho^{xy} + \tau^{xy} = 1$ , и это вторая новизна данной работы. Благодаря более точному описанию оптических свойств повышается точность инженерного расчета электрических модульно-спусковых печей. Но главное то, что получена аналитическая модель оптических свойств [формула (7)] однослойного плотного вспучивающегося вермикулитового потока на вибрационной подовой платформе печи новой концепции, которая может быть использована при математическом моделировании процессов теплоусвоения и теплопереноса в пространствах обжига ее модулей. Это третья новизна выполненного исследования.

\*\*\*

Поддержано грантом ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере». Договор № 1243 ГС 1 / 21693.

## Библиографический список

1. **Телегин, А. С.** Тепломассоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. — М.: Академкнига, 2002. — 455 с.
2. Производство и применение вермикулита; под ред. Н. А. Попова. — М.: Стройиздат, 1964. — 128 с.
3. **Подольяк, Ф. С.** Сравнительная эффективность печей для обжига вермикулита / Ф. С. Подольяк // Строительные материалы. — 1973. — № 7. — С. 9–11.
4. **Rits, M.** Vibrational spectroscopy of acid treated vermiculites / M. Rits, J. Zdralkova, M. Valaskova // Vibrational spectroscopy. — 2014. — Vol. 70. — P. 63–69.
5. **Raupach, M.** Polarized infrared study of anilinium-vermiculite intercalate. I. Spectra and models / M. Raupach, L. J. Janik // Journal of Colloid and Interface Science. — Vol. 121, № 2. — P. 449–465.
6. **Нижнегородов, А. И.** Энерготехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов / А. И. Нижнегородов, А. В. Звездин. — Иркутск: ИрНИТУ, 2015. — 250 с.
7. **Нижнегородов, А. И.** Альтернативная концепция энерготехнологических агрегатов для обжига вермикулита на базе электрических модульно-спусковых печей / А. И. Нижнегородов // Огнеупоры и техническая керамика. — 2014. — № 1/2. — С. 48–55.
8. Росгеолфонд. Ковдорское месторождение вермикулитовых руд [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rfgf.ru/license/itemview.php?iid=2659696> (25.07.2016).
9. Росгеолфонд. Татарское месторождение вермикулита. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rfgf.ru/bal/a/itemview.php?iid=328520> (25.07.2016).

10. Роснедра. Кокшаровское вермикулитовое месторождение [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rosnedra.gov.ru/article/2132.html> (25.07.2016).
11. **Кошкин, Н. И.** Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. — М.: Изд-во физико-математической литературы, 1972. — 256 с.
12. **Нижнегородов, А. И.** Критерии выбора оптимального режима работы электрической модульной печи для обжига вермикулита / А. И. Нижнегородов // Строительные материалы. — 2010. — № 5. — С. 78–81. ■

Получено 06.09.16

© А. В. Звездин, Т. Б. Брянских,  
А. И. Нижнегородов, 2017 г.

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ