

УДК 622.367.8:66.046.44]:621.365

## ПОЛУЧЕНИЕ ВСПУЧЕННОГО ВЕРМИКУЛИТА ИЗ КОНГЛОМЕРАТОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЬНО-СПУСКОВЫХ ПЕЧАХ

Рассмотрена технология обжига вермикулитовых конгломератов с высоким содержанием инертного материала. Завершение процесса обжига вермикулита осуществляется в дополнительном «нулевом» модуле за счет внутренней теплоты, накопленной в самом конгломерате, где происходит перенос излучения от частиц инертного материала на вермикулитовые зерна. Одновременно идет кондуктивный перенос теплоты в самих зернах от наружных слоев к глубинным. Такой способ использования рекуперированной теплоты позволяет снизить температурный режим электрифицированных модулей, уменьшить потребление электроэнергии и удельную энергоемкость процесса.

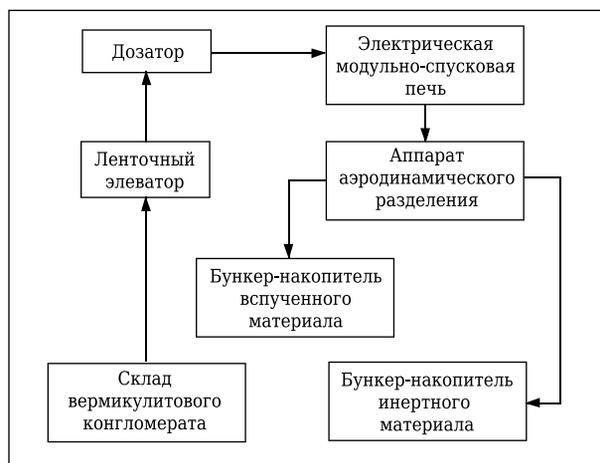
**Ключевые слова:** электрическая модульно-спусковая печь, вермикулит, инертный материал, энергия теплоусвоения, вторичные энергетические ресурсы (ВЭР), тепловое излучение, «нулевой» модуль, коэффициент полезного действия печи.

**В**спученный вермикулит как исходное сырье для целого ряда огнеупорных, огнезащитных, термо- и теплоизоляционных материалов и изделий по-прежнему остается востребованным. Кроме вермикулитовых концентратов сырьевым источником для его получения являются техногенные отходы хвостохранилищ, образовавшихся при переработке вермикулитовых руд. Известно, что во многих случаях использование техногенного минерального сырья достаточно эффективно и соизмеримо по экономическим показателям с переработкой полезных ископаемых, извлекаемых непосредственно при разработке природных месторождений. Оно требует меньших затрат на добычу, измельчение и технологическую подготовку, а его вовлечение в промышленную переработку сокращает затраты на поддержание отвалов и хвостохранилищ [1]. Только на Ковдорском месторождении накоплено сотни тысяч тонн так называемых «мокрых» хвостов с массовой долей вермикулита различных фракций до 27 %, а в некоторых случаях до 52 % [2]. Такие конгломераты марок КВП-1 и КВП-2 после соответствующей подготовки предлагались потребителям Ковдорским ГОКом, но не имели значительного спроса из-за отсутствия эффективной энергосберегающей технологии их переработки.

Новая концепция электрических модульно-спусковых печей с системой рекуперации тепловой энергии позволяет решить эту проблему

с минимальными энергозатратами [3, 4]. Цель проведенных исследований — анализ процесса поглощения тепловой энергии конгломератом с различным содержанием инертного материала; изучение дообжига вермикулита в «нулевом» модуле, проводимого за счет внутренней теплоты, излучаемой частицами инертного материала на вермикулитовые зерна, при одновременном кондуктивном переносе теплоты в зернах вермикулита от наружных слоев к глубинным; создание энергоэффективной печи, работающей с пониженным температурным режимом при меньшем потреблении электроэнергии.

На рис. 1 показана технологическая схема производства вспученного вермикулита из конгломератов и грубообогащенных концентратов с содержанием инертного материала от 6 до 73 %.



**Рис. 1.** Технологическая схема производства вспученного вермикулита из конгломератов и грубообогащенных концентратов

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

Сырье со склада подается элеватором в дозатор электрической модульно-спусковой печи. После обжига материал подвергается аэродинамическому разделению на легкие и тяжелые фракции и накапливается в соответствующих бункерах. Устройство трехмодульной печи показано на рис. 2. Печь оснащена аппаратом аэродинамического разделения вспученного вермикулита и инертного материала (песка, каменного граулята и т. п.), встроенным в приемный бункер.

Печь содержит барабанный дозатор сырья 1 с небольшим бункером 2, рифленным барабаном 3 и спусковым лотком 4. В корпусе печи на рамах 5 расположены электрифицированные модули обжига 6 с термокрышками 7, под которыми продольно размещены электрические нагреватели, закрепленные на специальных головках 8. Все элементы печи собраны на каркасе 9 с двухслойными термоизолированными стальными стенками (стенки не показаны). При обжиге конгломератов вспученный вермикулит с инертным материалом выходит из нижнего модуля печи и по лотку 10 с цилиндрической нижней частью поступает в бункер-накопитель 11. Бункер оснащен аппаратом аэродинамического разделения, содержащим перфорированную трубку 12 и отводную трубу 13 с раструбом 14. При подводе воздуха в перфорированную трубку создаются радиальные воздушные потоки, отбрасывающие вспученные зерна вермикулита к периферии бункера, а тяжелый инертный материал падает отвесно в раструб отводной трубы. Так как истинная плотность вспученного вермикулита в зависимости от фракции составляет 60–120 кг/м<sup>3</sup>, а плотность инертного материала 1800–2400 кг/м<sup>3</sup>, полное разделение происходит уже на высоте  $h$ , равной 0,6 м [5].

Из-за влияния инертного материала распределение поглощенной энергии при обжиге изменяется:

$$\theta_{\Sigma}^{\text{нк}} = k_{\text{к}}(\theta_{\text{x}} + \theta_{\text{с}} + \theta_{\text{в}} + \theta_{\text{п}} + \theta_{\text{а.г}}) + (1 - k_{\text{к}}) \cdot (\theta_{\text{и}} + \theta_{\text{в.и}}), \quad (1)$$

где  $\theta_{\Sigma}^{\text{нк}}$  — суммарная энергия теплоусвоения инертного материала и вермикулита;  $k_{\text{к}}$  — коэффициент, учитывающий массовую долю вермикулита в 1 кг вермикулитового конгломерата;  $\theta_{\text{x}}$  — теплота дегидратации химически связанной воды;  $\theta_{\text{с}}$  — теплота нагрева сухой части минерала;  $\theta_{\text{в}}$  — теплота фазового перехода физической (межслоевой) и гидратной воды;  $\theta_{\text{п}}$  и  $\theta_{\text{а.г}}$  — теплота перегрева водяных паров и адсорбированных газов;  $\theta_{\text{и}}$  — теплота нагрева инертного материала;  $\theta_{\text{в.и}}$  — теплота испарения физической воды, адсорбированной материалом:

$$\theta_{\text{и}} = 0,955 c_{\text{и}} m \Delta T, \quad \theta_{\text{в.и}} = 0,045 c_{\text{по}} m, \quad (2)$$

где 0,955 и 0,045 — доли сухой части и влаги в 1 кг инертного материала;  $c_{\text{и}}$  — удельная теплоемкость инертного материала (для песка в диапазоне 20–800 °С изменяется в пределах 880–1005

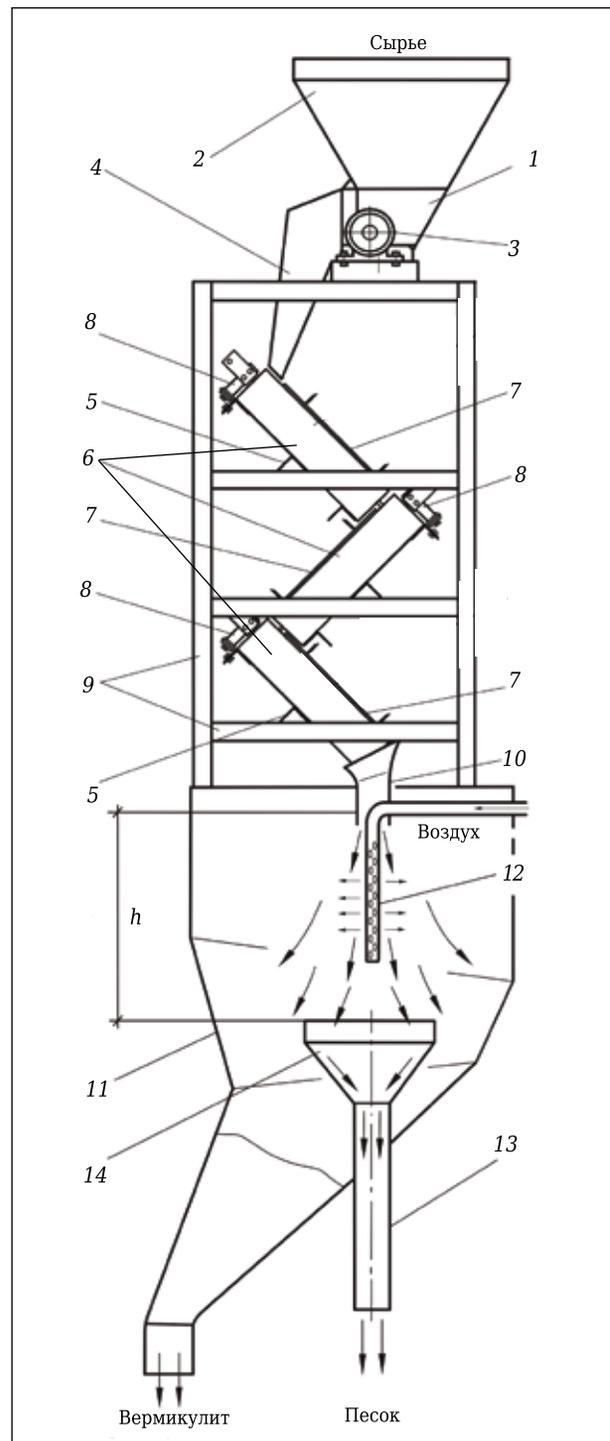


Рис. 2. Устройство печи с аппаратом аэродинамического разделения вспученного вермикулита и инертного материала

Дж/(кг·°С) при среднем значении 943 Дж/(кг·°С) [6];  $m$  — масса инертного материала;  $\Delta T$  — изменение температуры от 100 °С (предварительный нагрев перед обжигом) до конечной температуры нагрева;  $c_{\text{по}}$  — удельная теплота парообразования,  $c_{\text{по}} = 2250 \cdot 10^3$  Дж/кг.

Теплота, полученная инертным материалом при обжиге, равна  $\theta_{\text{и}} = 585,4$  кДж, а энергия

фазового перехода адсорбированной воды  $\theta_{\text{ви}} = 101,3$  кДж. Тогда выражение (1) примет вид

$$\theta_{\Sigma}^{\text{пк}} = 1201,9k_k + 686,7(1 - k_k), \quad (3)$$

где 1201,9 — энергия теплоусвоения для 1 кг ковдорского концентрата [5]; коэффициент  $k_k$  составляет 1–0,94 для концентратов, 0,94–0,52 для грубообогатенных концентратов, 0,52–0,27 для техногенных отходов хвостохранилищ (конгломератов).

Из рис. 3, кривая 1, видно, что энергия теплоусвоения 1 кг конгломерата снижается с увеличением доли инертного материала, что указывает на уменьшение энергоемкости процесса. Однако с учетом снижения выхода вспученного вермикулита удельная энергоемкость должна возрастать, а коэффициент полезного действия снижаться. Энергия  $E_{\text{м.т}}$  и  $\eta_{\text{м.т}}$  механической трансформации вермикулита для ковдорских конгломератов определяются по выражениям [7]:

$$E_{\text{м.т}} = k_k (\theta_x + \theta_v + \theta_{\text{п}} + \theta_{\text{аг}}), \quad (4)$$

$$\eta_{\text{м.т}} = \frac{E_{\text{м.т}}}{\theta_{\Sigma}}, \quad (5)$$

а значения  $E_{\text{м.т}}$  и  $\eta_{\text{м.т}}$  при содержании вермикулита 94, 52 и 27 % соответственно равны 617,8, 341,7 и 177,4 кДж/кг и 0,53, 0,36 и 0,22.

На рис. 3, кривая 2, показано изменение  $\eta_{\text{м.т}}$  механической трансформации при обжиге конгломератов с различным содержанием инертного материала. Для чистого вермикулитового концентрата (КВК)  $\eta_{\text{м.т}} = 0,544$  [7], по мере «засорения» концентрата, например песком,  $\eta_{\text{м.т}}$  снижается до 0,53 при содержании песка 6 %. При обжиге концентратов с содержанием инертного материала 48–73 %  $\eta_{\text{м.т}}$  снижается до 0,36–0,22 (при среднем 0,29) из-за бесполезного расхода электроэнергии на его нагрев. Чтобы повысить энергетическую эффективность переработки отходов обогащения вермикулитовых руд, необхо-

димо обратиться к конструкции электрических модульно-спусковых печей новой концепции с так называемым «нулевым» модулем, работающим на вторичных энергетических ресурсах (ВЭР) [4]. Так как коэффициент  $k_k$  изменяется в значительных пределах, то соотношение усвоенных энергий  $\theta_{\Sigma}$  (суммарная энергия теплоусвоения чистого вермикулита) и  $\theta_{\Sigma}^{\text{пк}}$  будет зависеть от содержания вермикулита в вермикулитовом концентрате. Новая концепция электрических модульно-спусковых печей, основанная на использовании ВЭР для энергосбережения при обжиге конгломератов, позволит сделать их переработку экономически выгодной.

В выражении (1) представлены две составляющие энергии теплоусвоения, отражающие накопленную тепловую энергию:  $\theta_c$  — во вспученном вермикулите и  $\theta_{\text{и}}$  — в инертном материале. После разделения компонентов каждая из составляющих рассеивается в окружающую среду после их естественного остывания. Поскольку  $\theta_c$  в 1 кг концентрата составляет примерно 560 кДж [4], а  $\theta_{\text{и}}$  в 1 кг песка примерно 585 кДж, при  $k_k$ , равном, например, 0,4, суммарная накопленная тепловая энергия  $\theta_v$  ВЭР будет равна  $\theta_v = 0,4 \cdot 560 + 0,6 \cdot 585 = 224 + 351 = 575$  кДж. Для сравнения: в 1 кг чистого вермикулита  $\theta_{\Sigma}$  равна 1201,9 кДж. Такое значение накопленного ВЭР в конце обжига вермикулитового концентрата с содержанием вермикулита 40 % при полностью завершённом процессе.

Рассмотрим трехмодульную энергосберегающую печь (рис. 4). Она содержит барабанный дозатор сырья 1 с бункером 2, рифленным барабаном 3 и спусковым лотком 4. В корпусе расположены электрифицированные модули обжига 5 с рекуператорами тепловой энергии 6, установленные над торцевыми частями двух верхних модулей и соединенные с трубопроводами 7. Дополнительный неэлектрифицированный Г-образный «нулевой» модуль 8 расположен под нижним электрифицированным модулем и соединен тепловыми камерами с трубопроводами для теплоносителя 7. Модули 5 закрыты термомышками 9, под которыми продольно размещены электрические нагреватели, закрепленные на токопроводящих головках 10. Рекуператоры тепловой энергии 6 выполнены в виде заглушенных полуцилиндров и перфорированы отверстиями, направленными в сторону торцов модулей 5. Полуцилиндры имеют шероховатую зачерненную поверхность для максимального поглощения лучистой энергии, идущей от нагревателей через торцы модулей. Корпус печи имеет каркас с термоизолированными стенками и дверцами (на рис. 4 не показаны).

Между тепловыми камерами «нулевого» модуля 8 расположены полости, заполненные термоизоляционным материалом, а между ними внутри — пространство обжига, по которому движется вермикулитовый концентрат после выхода из нижнего модуля 5. В тепловые каме-

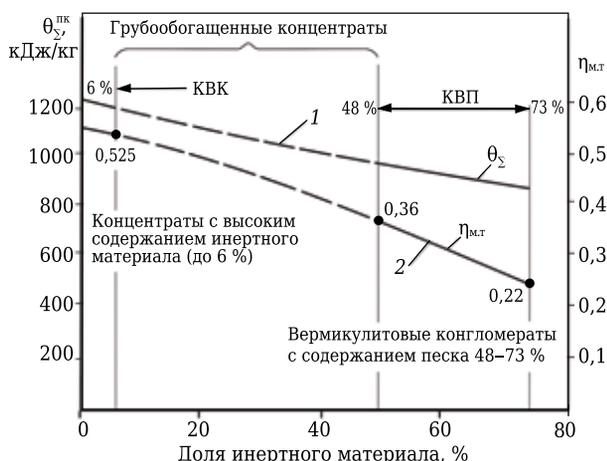


Рис. 3. Зависимости энергии теплоусвоения  $\theta_{\Sigma}^{\text{пк}}$  вермикулитовых конгломератов и КПД  $\eta_{\text{м.т}}$  от содержания инертного материала

ры теплоноситель (горячий воздух) подводится по патрубкам трубопровода 7. Барабанный дозатор подает вермикулитовый конгломерат в печь, где он пересыпается в верхних электрифицированных модулях обжига внутри рабочих камер, образованных параллельно установленными нагревателями. Далее обжигаемый материал поступает в «нулевой» модуль, а разделение легких и тяжелых фракций производится в аэродинамическом аппарате (см. рис. 1).

В рабочих камерах электрифицированных модулей конгломерат находится под действием теплового излучения, идущего от нагревателей, и отраженного излучения от огнеупорного основания и термодышки. На двух верхних модулях происходит интенсивное теплоусвоение компонентов потока благодаря переносу лучистой энергии как на частицы вермикулита, так и на частицы песка в соответствии с уравнением (1). Вспучиваясь, зерна вермикулита образуют вокруг себя «тепловую рубашку», все более затрудняя проникновение лучистой энергии в глубинные слои. Именно поэтому закон дегидратации вермикулита (рис. 5) при обжиге различных размерных групп концентратов КВК-1, КВК-2 и КВК-3 имеет характер, близкий к асимптотическому ( $\rho_n$  и  $\rho_k$  — начальная и конечная плотность вермикулита).

Инертный материал нагревается значительно быстрее, так как его частицы существенно меньше и они обладают гораздо большей теплопроводностью. Определим отношение коэффициентов теплопроводности песка  $\chi_n$  и вспученного вермикулита  $\chi_v$  [8]:

$$\chi_n / \chi_v = \lambda_n \rho_v c_v / \lambda_v \rho_n c_n, \quad (6)$$

где  $\lambda_n$  — теплопроводность инертного материала (например, песка),  $\lambda_n \sim 0,35$  Вт/(м·°С);  $\lambda_v$  — теплопроводность вспученного вермикулита,  $\lambda_v \sim 0,056$  Вт/(м·°С);  $\rho_v$  — плотность вермикулита,  $\rho_v \sim 200$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_n$  — плотность инертного материала,  $\rho_n \sim 1600$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_v$  — удельная теплоемкость вспученного вермикулита,  $c_v \sim 1625$  Дж/(кг·°С);  $c_n$  — удельная теплоемкость песка,  $c_n \sim 800$  Дж/(кг·°С) [9].

Если пренебречь тем, что коэффициенты теплопроводности зависят от температуры, и принять их средние значения, то расчет по формуле (6) дает отношение  $\chi_n / \chi_v$ , равное 1,51. Это показывает, что скорость нагревания песка примерно в 1,5 раза выше и, следовательно, при длительности обжига  $t = 2,7$  с (см. рис. 5) песок достигнет предельной температуры около 750 °С уже на 2-м модуле, тогда как вермикулит — только на выходе из печи.

При переходе потока конгломерата в «нулевой» модуль (см. рис. 4) процесс вспучивания вермикулита продолжается, но уже не от внешнего источника, как это было в электрифицированных модулях. В Г-образном «нулевом» модуле происходит распределение внутренней накопленной теплоты в массиве частиц вермикулитового кон-

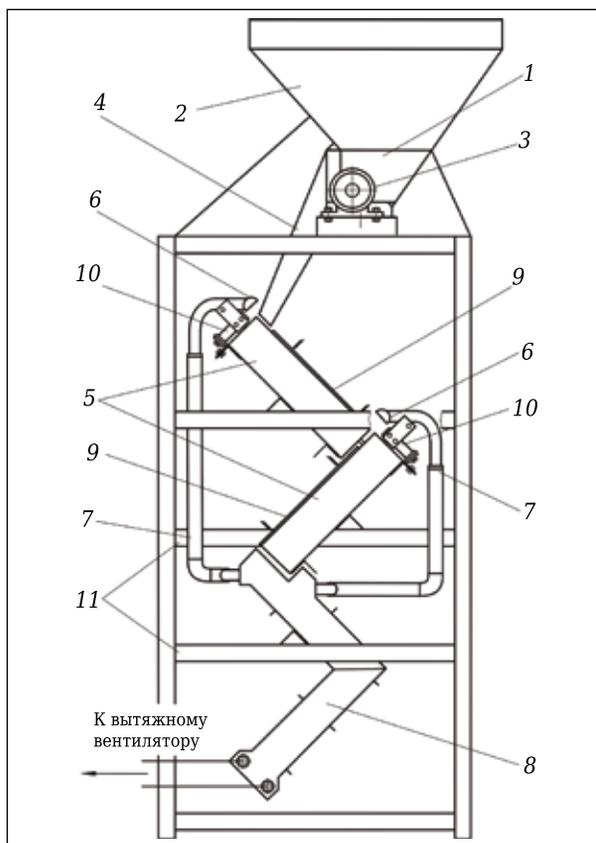


Рис. 4. Трехмодульная энергосберегающая печь

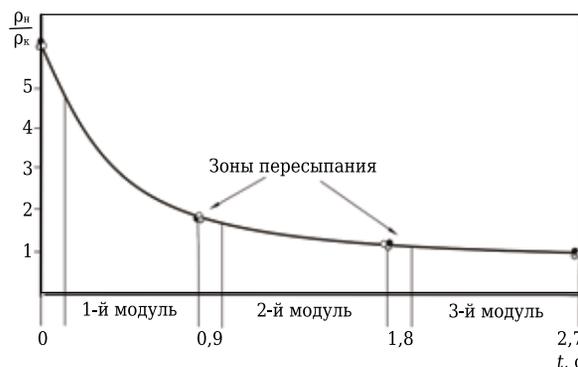


Рис. 5. Изменение относительной плотности вермикулита в процессе обжига: ○ — концентрат КВК-1; ● — концентрат КВК-2; ■ — концентрат КВК-3

центра при отсутствии внешнего излучения (рис. 6). В плоском рабочем пространстве «нулевого» модуля происходит перенос лучистой энергии частиц инертного материала на вермикулитовые зерна и параллельно с этим идет кондуктивный перенос теплоты в самих зернах от наружных слоев в глубинные. На заключительной стадии процесса скорость уменьшения плотности вермикулита значительно снижается по сравнению с начальной стадией (см. рис. 5). Тем важнее, что глубинные слои вермикулитовых зерен получают тепловую энергию кондуктивным переносом

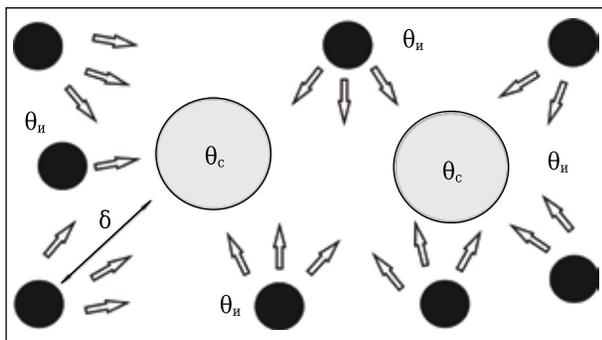


Рис. 6. Распределение внутренней теплоты в массиве частиц вермикулитового конгломерата

от внешних слоев, а внешние пополняют потери энергии, ушедшей вглубь, лучистой энергией от частиц инертного материала (см. рис. 6).

При обжиге конгломератов в энергосберегающих электрических модульно-спусковых печах процесс теплоусвоения вермикулита из-за перераспределения потоков энергии описывается системой уравнений:

$$\theta_{\Sigma}^{пк*} = k_k k_3 (\theta_x + \theta_v + \theta_n + \theta_{ар} + \theta_c) + (1 - k_k) \theta_n, \quad (7)$$

$$k_k k_3 \theta_c + (1 - k_k) \theta_n \approx k_k (1 - k_3) (\theta_x + \theta_v + \theta_n + \theta_{ар}), \quad (8)$$

где  $\theta_{\Sigma}^{пк*}$  — тепловая энергия, усвоенная вермикулитовым конгломератом при его прохождении по двум верхним электрифицированным модулям печи при незавершенном процессе обжига;  $k_k$  — коэффициент, учитывающий долю усвоенной вермикулитом тепловой энергии до входа в «нулевой» модуль, зависящий от температурного режима печи, времени движения  $t_m$  вермикулитового концентрата под действием лучистой энергии внешнего источника (в верхних модулях печи) и

#### Библиографический список

1. Трубецкой, К. Н. Классификация техногенных месторождений, основные категории и понятия / К. Н. Трубецкой, В. Н. Уманец, М. Б. Никитин // Горный журнал. — 1989. — № 1. — С. 33–41.
2. Гершенкоп, А. Ш. Выделение вермикулитового концентрата из хвостов обогащения вермикулитовых руд и его использование в жаростойком бетоне / А. Ш. Гершенкоп, М. С. Хохуля, О. Н. Крашенинников, С. В. Бастрыгина // Горный журнал. — 2011. — № 11. — С. 57–59.
3. Нижнегородов, А. И. Развитие концепции энерготехнологических агрегатов для обжига вермикулитовых концентратов на базе электрических модульно-спусковых печей / А. И. Нижнегородов // Огнеупоры и техническая керамика. — 2014. — № 1/2. — С. 36–44.
4. Нижнегородов, А. И. Электрические модульно-спусковые печи с системой рекуперации энергии для обжига вермикулитовых концентратов / А. И. Нижнегородов // Новые огнеупоры. — 2015. — № 10. — С. 22–27.
5. Нижнегородов, А. И. Технологии и оборудование для переработки вермикулита: оптимальное фракционирование, электрический обжиг, дообогащение / А. И. Нижнегородов. — Иркутск : ИрГТУ, 2011. — 172 с.

соотношения вермикулита и инертного материала, определяемого значением коэффициента  $k_k$ .

Перед членом уравнения (8)  $(1 - k_k) \theta_n$  коэффициент  $k_3$  не стоит, так как инертный материал в силу соотношения (6) полностью усвоил тепловую энергию еще до входа в «нулевой» модуль. Этим же объясняется отсутствие члена  $\theta_{в.и}$  в уравнениях (7) и (8), так как вся физически адсорбированная инертным материалом вода испарилась еще на начальном этапе обжига в верхних модулях печи.

В уравнении (8) знак приближенного равенства показывает, что в зависимости от доли вермикулита  $k_k$ , тепловой энергии, накопленной в вермикулите и инертном материале, выражаемой членом  $k_k k_3 \theta_c + (1 - k_k) \theta_n$ , уравнения (8) может не хватить для полного завершения его дегидратации и вспучивания. Но сбалансировать уравнение (8) можно, изменяя время  $t_m$  и температурный режим печи, увеличивая тем самым значение коэффициента  $k_3$ , время  $t_0$  движения конгломерата в «нулевом» модуле и концентрацию его частиц в рабочем пространстве, сокращая средний интервал  $\delta$  между ними (см. рис. 6), что сократит потери при теплопередаче от частиц инертного материала к вермикулитовым зернам.

Использование ВЭР позволит заменить третий электрифицированный модуль «нулевым», уменьшить потребление электроэнергии до 33 % и снизить удельную энергоемкость обжига конгломератов. Рекуперация теплоты и ее использование в основном технологическом процессе открывает перспективу применения энергосберегающих модульно-спусковых печей для переработки не только техногенных отходов, но и грубо обогащенных вермикулитовых концентратов, технология получения которых значительно проще, чем традиционных [10].

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

7. Нижнегородов, А. И. Теория и опыт применения электрических модульно-спусковых печей для обжига вермикулита / А. И. Нижнегородов // Новые огнеупоры. — 2015. — № 8. — С. 34–38.

Nizhegorodov, A. I. Theory and practical use of modular-pouring electric furnaces for firing vermiculite / A. I. Nizhegorodov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 361–365.

8. Телегин, А. С. Тепломассоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. — М. : Академкнига, 2002. — 455 с.

9. Тымчак, В. М. Расчет нагревательных и термических печей : справ. изд. / В. М. Тымчак, В. Л. Гусовский. — М. : Металлургия, 1983. — 480 с.

10. Производство и применение вермикулита ; под ред. проф. Н. А. Попова. — М. : Стройиздат, 1964. — 128 с. ■

Получено 19.05.15

© А. И. Нижнегородов, 2016 г.