

УДК: 622.784:622'17

ПРИМЕНЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ ТЕРМОАКТИВАЦИИ СЕРПЕНТИНОВЫХ МИНЕРАЛОВ ИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Нижегородов Анатолий Иванович¹,

nastromo_irkutsk@mail.ru

Гаврилин Алексей Николаевич²,

tom-gawral@list.ru

Мойзес Борис Борисович²,

mbb@tpu.ru

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Серпентиновые минералы, в больших количествах содержащиеся в горнопромышленных отходах, входят в состав вермикулита. Представители серпентиновых материалов – сингулит и вспученный вермикулит – нашли применение в природоохранных технологиях: первый – для детоксикации техногенно загрязненных земель и водных объектов, второй – для почвообразования. Вспученный вермикулит также широко применяется в металлургии, строительстве и других отраслях экономики. Это обуславливает необходимость поисковых работ по разработке технологий и оборудования для получения данных материалов.

Цель исследования: создание технологии электрической термоактивации сунгулита в энерготехнологических агрегатах в процессе обжига предварительно обогащенных конгломератов, полученных из горнопромышленных отходов, содержащих сунгулит, вермикулит и оливин-пироксеновые породы.

Объект: технология получения продуктов термоактивации серпентиновых минералов из промышленных отходов.

Методика исследования базируется на усовершенствовании технологии переработки сунгулитовых конгломератов посредством добавления в технологический процесс процесса термообработки модернизированных электрических модульно-спусковых печей. В конструкцию печей введен модуль с подвижной платформой с электрическим нагревателем.

Результаты исследования по вопросам модернизации технологии получения продуктов термоактивации серпентиновых минералов из промышленных отходов позволили разработать энерготехнологические агрегаты на базе модифицированных электрических модульно-спусковых печей или печей с вибрационно-подовой платформой с возможностью частичной компенсации затрат энергии на нагрев бесполезной оливин-пироксеновой породы и тем самым уменьшить энергоемкость технологического процесса. Эффективность модернизации подтверждается отсутствием ущерба для качества получаемых материалов. В результате разработана перспективная технология получения продуктов термоактивации серпентиновых минералов из промышленных отходов.

Ключевые слова:

Серпентиновые минералы, сунгулит, вермикулит, сырьевой конгломерат, термоактивация, тепловая энергия, электрическая печь, дополнительный модуль.

Введение

Интерес к серпентиновым минералам, которые входят в состав вермикулитовых, магнезитовых, оливинитовых и медно-никелевых пород, содержащихся в больших количествах в горнопромышленных отходах [1], появился в связи с их вяжущими свойствами. При дегидратации серпентинов в интервале температур 670...720 °С происходит образование метасерпентина [2], который и становится серпентиновым цементом [3]. Он не нашел широкого применения, но дальнейшие исследования термоактивированных серпентинов показали, что из них можно получать магнезиально-силикатные реагенты, которые оказались эффективным средством при очистке вод от тяжелых металлов [4]. В работах [1, 5, 6] рассмотрено влияние структуры серпентинов на активность реагента, выявлены оптимальные условия термоактивации, определены характеристики процесса взаимодей-

ствия реагента с растворами тяжелых металлов. Преимуществом магнезиально-силикатного реагента является сочетание в одном продукте положительных свойств этих материалов и возможность существенно снизить стоимость работ за счет использования некондиционного сырья – горнопромышленных отходов [5].

Другим полезным продуктом является вермикулит. Благодаря слоисто-пористой структуре вспученного вермикулита изделия на его основе отличаются высокими термоизоляционными свойствами. Это дает возможность их применения для футеровки электролизерных ванн для плавки алюминия и различных тепловых агрегатов, из него производят огнезащитные плиты и мастики, вермикулит является эффективным теплоизоляционным материалом, пористым наполнителем для легких бетонов, его применяют для звукоизоляции помещений, используют при разливке стали,

для фильтрации воды, в качестве адсорбента дыма и ядовитых газов, как противорадиационный материал [7–9].

Поэтому здесь будут рассмотрены два целевых продукта, которые можно получить – сунгулит, входящий в группу серпентиновых минералов, и вермикулит, в данном случае сопутствующий и очень ценный минерал.

Вспученный вермикулит, помимо применения в строительстве, металлургии, сельском хозяйстве и ряде других отраслей, может использоваться наряду с сунгулитом в природоохранных технологиях. Он участвует в процессах почвообразования, а сунгулит после термоактивации становится эффективным реагентом для детоксикации техногенно загрязненных земель и водных объектов, снижающим геохимическую подвижность тяжелых металлов [5].

Технология и оборудование

В исходном сырье основными минералами являются (по массе): сунгулит ~10 %, вермикулит ~13 %, пироксен и оливин ~50 %, остальное – антигорит, окислы железа и другие минералы [9]. Технология их разделения, разработанная в горном институте Кольского научного центра, включает дробление, обогащение в гидросепараторе с отведением слива, сушку и магнитную сепарацию [10]. Получаемая немагнитная фракция (рис. 1) является носителем целевых продуктов: вермикулита ~34 % и сунгулита ~23 %, оливин-пироксеновые породы ~39 %. Размеры частиц определены по выборке из наиболее мелких и наиболее крупных частиц. Выход немагнитной фракции составляет 13 % [9]; именно она является сырьем для разрабатываемой технологии получения указанных продуктов.

Насыпная плотность сунгулита ~1026 кг/м³: он на 21 % легче оливинпироксеновой фазы (~1300 кг/м³). При термообработке сунгулит дополнительно теряет в весе 15...18 % из-за выхода гидратной воды, а оливинпироксеновая фаза практически не изменяется [10]. Поэтому после термоудара, температурного «томления» и воздушного отделения вспучившегося вермикулита остаточный продукт подвергается вибросегрегации для окончательного удаления оливинпироксеновой фазы. Так может быть получен *сунгулитовый концентрат* с содержанием сунгулита по массе не ниже 90...95 %.

Степень активации сунгулита возрастает с увеличением скорости нагрева, следовательно, оптимальным режимом термообработки будет термоудар и выдержка («томление») при температуре ~600 °С в течение 20...25 минут [1, 5, 11].

Для реализации такого режима со скоростью нагрева 200...240 °С/с могут быть использованы энерготехнологические агрегаты на базе модифицированных электрических модульно-спусковых печей [12] или печей с вибрационно-подовой платформой [13]. Такая печь показана на рис. 2.



Рис. 1. Сырьевой конгломерат из немагнитной фракции с частицами 0,5...4,0 мм (фотография)

Fig. 1. Raw conglomerate of non-magnetic fraction with particles of 0,5...4,0 mm (photography)

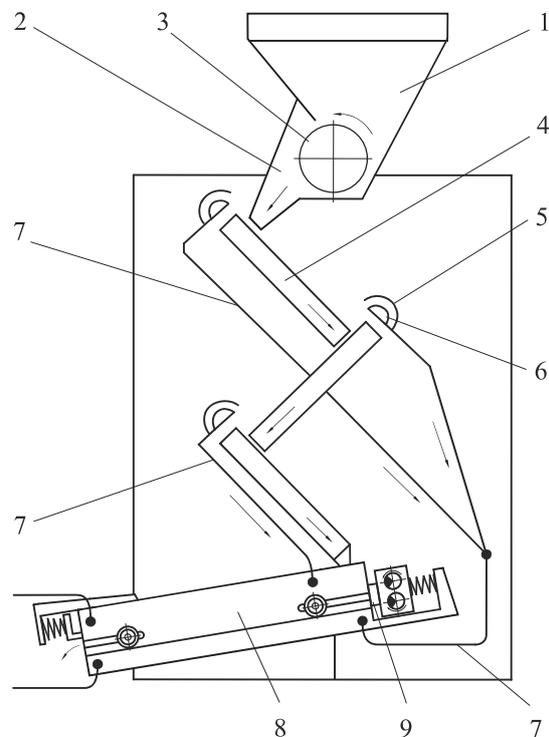


Рис. 2. Модифицированная электрическая модульно-спусковая печь

Fig. 2. Upgraded electric modular-trigger furnaces

Она содержит дозатор сырья – 1 с лотком – 2 и барабаном – 3. В корпусе печи под углом друг к другу расположены электрифицированные модули – 4 с рекуператорами тепловой энергии – 5 и перфорированными всасывателями – 6, которые соединены с трубопроводами – 7. Дополнительный не электрифицированный модуль – 8 расположен под нижней электрифицированным и снабжен в верхней и нижней частях коллекторами. Трубопроводы – 7 соединены с коллекторами в верхней части модуля – 8, а коллекторы в нижней его части соединены трубопроводами с бункером-осадителем, снабженным вытяжным вентилятором (на

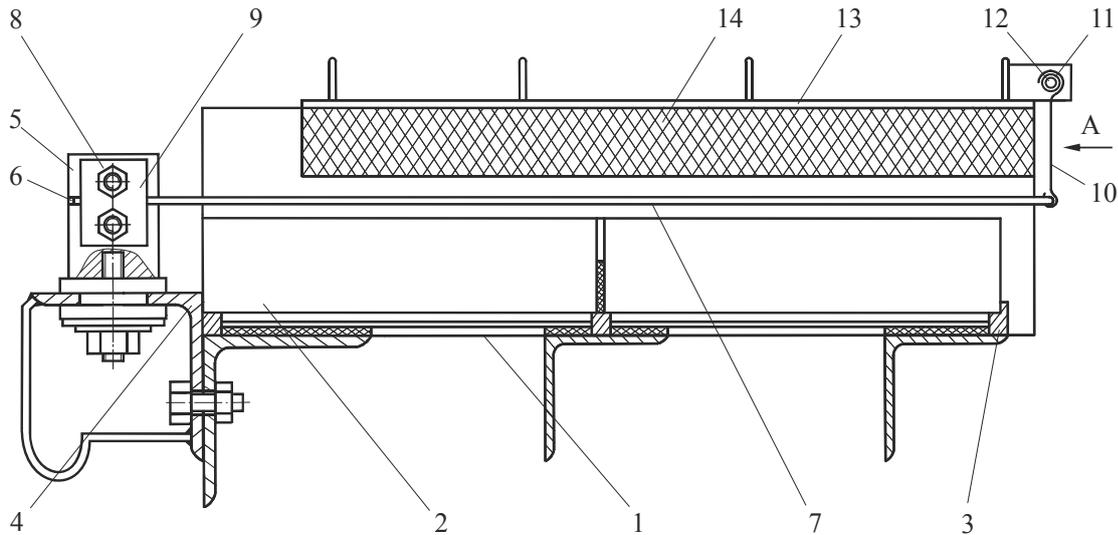


Рис. 3. Электрифицированный модуль печи

Fig. 3. Electrified furnace module

рис. 2 не показаны). В корпусе модуля – 8 размещена подвижная платформа – 9.

На рис. 3 показана новая конструкция модуля с электрическими нагревателями. Модуль имеет раму – 1 с огнеупорным основанием – 2 из шамотного кирпича, которые в наклонном положении модуля удерживаются упором – 3. На панели – 4 установлены головки – 5, которые закреплены на ней шпильками через электроизолирующие прокладки. В пазах – 6 установлены проволочные электрические нагреватели – 7, зафиксированные с помощью резьбовых соединений – 8 и пластин – 9. Нагреватели – 7 в собранном виде располагаются над поверхностью огнеупорного основания с регулируемым зазором. Консоли нагревателей закреплены с люфтом в серьгах – 10, выполненных из полосового нихрома, верхние части ко-

торых через огнеупорные керамические втулки – 11 образуют со стержнем – 12 шарнирное соединение. Для уменьшения тепловых потерь крышка – 13 имеет слой термоизоляции – 14.

Сырьевой концентрат подается дозатором – 1 (рис. 2) по лотку – 2 в верхний модуль – 4. Двигаясь по основаниям электрифицированных модулей, его частицы проходят под раскаленными до ~720...750 °С нагревательными элементами, нагреваются, а вермикулит вспучивается, и пересыпается с одного модуля на другой. Серьги – 10 не ограничивают температурное удлинение нагревателей, удерживая от провисания их консольные части.

Далее термообрабатываемый материал поступает в не электрифицированный модуль – 8 (рис. 2). На рис. 4 он показан в горизонтальном по-

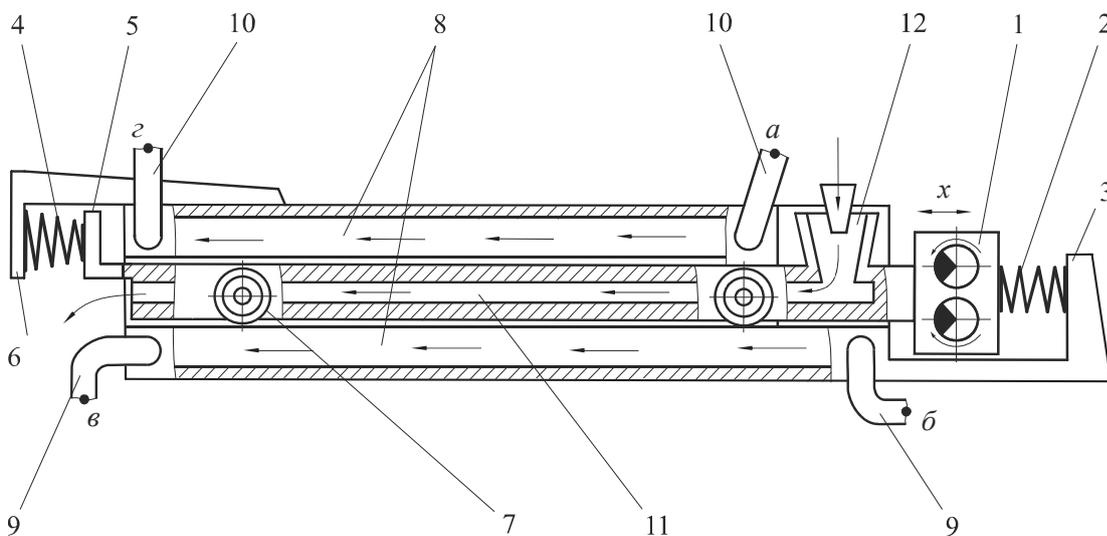


Рис. 4. Не электрифицированный модуль в подвижной платформе

Fig. 4. Nonelectrified furnace module in the movable platform

ложении и содержит низкочастотный возбудитель колебаний – 1, цилиндрические пружины – 2, упирающиеся в выступ – 3 корпуса, и конические пружины – 4, размещенные между упором – 5 и выступом – 6 корпуса.

Подвижная платформа – 9 (рис. 2) имеет ролики – 7 (рис. 4), установленные на осях, выходящих за пределы корпуса модуля через прорезы в его боковых поверхностях. В корпусе, выполненном из стальных листов, имеются верхние и нижние тепловые камеры – 8, утепленные термоизоляционным материалом, образующие пространство, в котором и размещена платформа с возбудителем колебаний. Тепловые камеры сообщены с патрубками – 9, которые в точках *a* и *b* присоединяются через коллекторы к трубопроводам (рис. 1), и с патрубками – 10, которые в точках *v* и *z* присоединены к трубопроводам, сообщенным с бункером-осадителем, снабженным вытяжным вентилятором (на рис. 2 не показаны). Подвижная платформа состоит из стальных листов с теплоизоляционными слоями и имеет плоскую щелевидную камеру – 11, сообщенную с раструбом – 12.

Благодаря роликам, коническим пружинам и возбудителю колебаний платформа совершает несимметричные колебания, при которых максимальное ускорение, направленное вправо $|\ddot{x}_n|$, не равно максимальному ускорению, направленному влево $|\ddot{x}_n|$:

$$|\ddot{x}_n| > \frac{fG}{m} > |\ddot{x}_n|,$$

где *f* – действительный коэффициент трения; *G* и *m* – вес и масса частицы, находящейся на платформе.

Такие колебания вызывают односторонний транспортный эффект без отрыва частиц [14]. Усиление этой тенденции дает наклон не электрифицированного модуля, а подстраивать скорость движения сырьевого материала в щелевидной камере под производительность печи можно за счет регулирования амплитуды и частоты колебаний.

Особенность процесса термоактивации сунгулита состоит в том, что одновременно с ним нагреву подвергаются оливин-пироксеновая фаза и вермикулит. Поглощаемое им тепло сразу совершает работу всучивания, а энергия нагрева пироксена и оливина становится вторичным энергоресурсом, который используется при переходе конгломерата в дополнительный не электрифицированный модуль печи.

Сравним скорости нагрева компонентов сырьевого конгломерата по коэффициентам их теплопроводности [15]:

$$\chi = \frac{\lambda}{\rho c}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; ρ – истинная плотность минералов, кг/м³; *c* – их удельная теплоемкость, Дж/кг·К.

Согласно формуле (1), получим:

• оливин

$$\chi_o = \frac{\lambda_o}{\rho_o c_o} = \frac{5}{2300 \cdot 795} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с};$$

• пироксен

$$\chi_n = \frac{\lambda_n}{\rho_n c_n} = \frac{4,380}{2300 \cdot 748} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с};$$

• сунгулит

$$\chi_c = \frac{\lambda_c}{\rho_c c_c} = \frac{2,085}{1760 \cdot 950} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с};$$

• вермикулит

$$\chi_b = \frac{\lambda_b}{\rho_b c_b} = \frac{0,060}{200 \cdot 879} = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Данные о значениях λ , ρ и *c* указанных минералов получены из источника [15].

Среднее значение коэффициента теплопроводности для оливина и пироксена составляет $\chi_{оп} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$.

Возьмем отношения:

$$\frac{\chi_{оп}}{\chi_b} = \frac{2,6 \cdot 10^{-6}}{0,3 \cdot 10^{-6}} \approx 8,7$$

и

$$\frac{\chi_{оп}}{\chi_c} = \frac{2,6 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot 10^{-6}} \approx 2,2.$$

Так, ориентировочно мы установили, что оливин-пироксеновая фаза достигнет конечной температуры почти в 9 раз быстрее, чем вермикулит, так как он не всучивается и не изолирует себя, и примерно в 2,2 раза быстрее, чем сунгулит.

Если для сунгулита необходима конечная температура 600 °С [1, 5], то конструктивные параметры электрифицированных модулей печи и температура их нагревателей должны быть подобраны определенным образом. На входе в дополнительный модуль оливин и пироксен за счет более быстрого нагрева должны быть перегреты до температуры 700...730 °С, а сунгулит – недогретым (~530...560 °С). Вермикулит в своих поверхностных слоях должен иметь температуру 600...700 °С, быть частично недоиспеченным и относительно «холодным» в глубинных слоях (~300 °С). Выравнивание температур и доведение компонентов конгломерата «до кондиции» должно осуществляться уже не за счет внешнего источника энергии (нагревательных элементов), а за счет перераспределения теплоты между самими компонентами внутри дополнительного модуля с подвижной платформой.

В электрифицированных модулях значительная часть выделяющейся теплоты нагревает воздух, который становится теплоносителем с температурой 380...400 °С. Рекуператоры печи – 5 через перфорированные всасыватели – 6 (рис. 2) «собирают» его и по трубопроводам за счет разряжения вытяжного вентилятора направляют в дополнительный модуль. Так создаются условия, практи-

чески исключают теплообмен между компонентами конгломерата, находящегося в щелевом пространстве платформы, и внешней средой. Этому способствует также эффективная термоизоляция из муллитокремнеземистого войлока.

Движение частиц конгломерата за счет несимметричных колебаний и наклона платформы организовано так, что идет сплошной поток без зазоров между ними. Конструктивные (длина и ширина) и динамические (частота и амплитуда) параметры подвижной платформы должны быть такими, чтобы было достаточно времени для завершения теплообменных процессов. В дополнительном модуле тяжелые частицы будут располагаться в нижнем слое, а легкий вермикулит займет верхний слой, не испытывая стесненных условий [16, 17], что дает ему возможность максимально эффективного довспучивания. При этом зерна сунгулита расположатся между пироксеновыми и оливиновыми частицами.

Все это создает максимально благоприятные условия для переноса лучистой энергии от более горячих частиц оливина и пироксена к менее горячим вермикулитовым и сунгулитовым частицам.

Параллельно идет кондуктивный перенос теплоты с горячих поверхностных слоев вермикуловых зерен в глубинные слои, сопровождающийся выравниванием их температур, дегидратацией и довспучиванием.

Таким образом, дополнительный модуль обеспечивает частичную компенсацию затрат энергии на нагрев бесполезной оливин-пироксеновой породы. Именно он позволяет использовать вторичный энергоресурс и, тем самым, уменьшить энергоемкость рассматриваемого технологического процесса.

Энергетические аспекты технологии

Определим ориентировочные значения усвоенных тепловых энергий минералами, входящими в состав сырьевого конгломерата с учетом температур их нагрева к моменту выхода из нижнего электрифицированного модуля печи.

Для оливин-пироксеновой фазы:

$$\theta_{\text{оп}} = 0,39c_{\text{оп}} \cdot 0,95mT_{\text{оп}} \quad (2)$$

и сунгулита:

$$\theta_{\text{с}} = 0,23c_{\text{с}} \cdot 0,95 \cdot 0,945mT_{\text{с}}, \quad (3)$$

где 0,39 и $c_{\text{оп}}$ – средняя удельная теплоемкость оливин-пироксеновой фазы (772 Дж/кг·К) и их весовая доля в конгломерате; 0,23 и $c_{\text{с}}$ – удельная теплоемкость (950 Дж/кг·К) и весовая доля сунгулита; 0,95 – коэффициент, учитывающий потерю массы минерала за счет выхода физической воды (при 5 % влажности); m – масса исходного конгломерата (1 кг); 0,945 – коэффициент, учитывающий неполную потерю массы при выходе химически связанной воды (15...18 % [5]) с остаточной весовой долей 4...7 %; $T_{\text{оп}}$ – примерная средняя температура перегрева оливин-пироксена (715 °С=988 К); $T_{\text{с}}$ – примерная средняя температура недогретого сунгулита (545 °С=818 К).

Расчет по формулам (2) и (3) дает следующие значения:

$$\theta_{\text{оп}} = 282594 \text{ Дж} \approx 282,6 \text{ кДж};$$

$$\theta_{\text{с}} = 160457 \text{ Дж} \approx 160,5 \text{ кДж}.$$

Энергия теплоусвоения сунгулита при температуре 600 °С (873 К) и полном выходе химически связанной воды будет равна:

$$\begin{aligned} \theta_{\text{с}} &= 0,23c_{\text{с}} \cdot 0,95 \cdot 0,835mT_{\text{с}} = \\ &= 151313 \text{ Дж} \approx 151,3 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Недостающая теплота, которая будет восполнена энергией оливина и пироксена в дополнительном модуле печи, равна 9,2 кДж.

Теплота, усваиваемая 1 кг вспученного вермикулита с учетом 5-ти процентной влажности при температуре обжига 750 °С (1023 К), определена в работах [12, 18–20] и равна 1209 кДж. При этом накопленная в полностью вспученном минерале остаточная теплота равна 551,9 кДж. Энергия дегидратации – 196,9 кДж, теплота фазового перехода – 258,8 кДж, энергии перегрева водяных и выведения адсорбированных газов соответственно равны 119,1 и 82,37 кДж. С учетом доли вермикулита (0,34), средней температуры к моменту выхода из нижнего электрифицированного модуля печи (450 °С=723 К), а также незавершенности дегидратации и вспучивания (примерно на 50 %) усвоенная тепловая энергия вермикулита составит:

$$\begin{aligned} \theta_{\text{в}} &= 0,34 \frac{552 + 0,5(197 + 259 + 119 + 82) \cdot 723}{1023} = \\ &= 211,6 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

При полностью завершенной дегидратации и вспучивании усвоенная вермикулитом теплота составит

$$0,34 \cdot 552 = 187,7 \text{ кДж}.$$

Недостающая теплота, которая будет восполнена энергией оливин-пироксеновой фазы в дополнительном модуле печи, будет равна 23,9 кДж.

Перегретая из-за большей теплопроводности (1) оливин-пироксеновая фаза имеет более чем восьмикратный запас энергии кДж (282,6 против 33,1). Учитывая, что средние температуры минералов соотносятся как:

$$\frac{T_{\text{оп ср}}}{T_{\text{с ср}}} = \frac{715}{545} \approx 1,31,$$

$$\frac{T_{\text{оп ср}}}{T_{\text{в ср}}} = \frac{715}{450} \approx 1,59,$$

можно с большой вероятностью прогнозировать, что дополнительный модуль обеспечит выравнивание температур и доведение целевых продуктов «до кондиции».

В подтверждение прогноза приведем экспериментальные данные, полученные при испытаниях электрической модульно-спусковой печи с дополнительным Г-образным модулем, показанной на рис. 5.

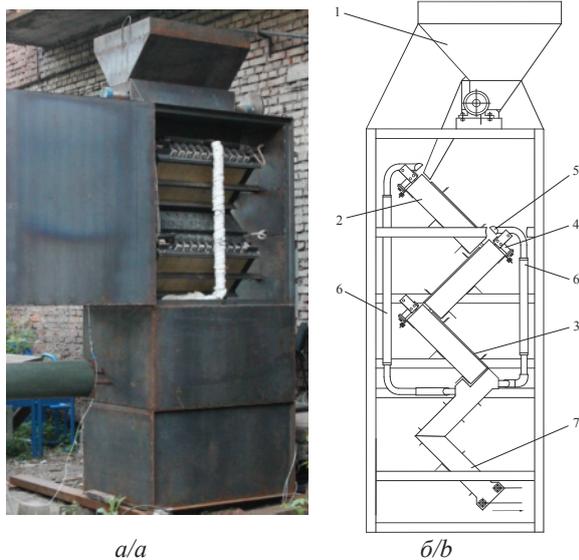


Рис. 5. Печь с Г-образным модулем: а) опытная печь, б) схема печи: 1 – дозатор, 2 – электромодуль, 3 – термокрышка, 4 – крепежная головка, 5 – рекуператор, 6 – трубопроводы, 7 – дополнительный модуль

Fig. 5. Furnace with a Г-shaped module: а) pilot furnace, б) furnace circuit design: 1 is the feed distributor, 2 is the electrical module, 3 is the thermal cover, 4 is the fastening head, 5 is the recuperator, 6 are the pipelines, 7 is the additional module

Эксперименты проводились на флогопит-вермикулитовом сырье с существенным содержанием песка и камней с размерами частиц от 1,5 до 4,5 мм при весовой доле последних около 12...15 %. Поставщиком этой небольшой партии сырья был институт химии и технологии редкоземельных элементов и минерального сырья (ИХТРЭМС) Кольского научного центра РАН, г. Апатиты Мурманской области, который являлся заказчиком опытной печи, показанной на рис. 5. Фракционный состав комбинированного

сырья был указан поставщиком как фракция +2 –4 при измеренной средней насыпной плотности 955,7 кг/м³ при влажности 7 %.

В процессе опытов определялись зависимости насыпной плотности вспучиваемого материала на входе в дополнительный модуль и на выходе из него от температуры нагревательных элементов. По мере ее увеличения разность насыпных плотностей $\Delta\rho$ уменьшалась: при температуре 815 °С $\Delta\rho$ составила 53 кг/м³, при $T=875$ °С $\Delta\rho$ была равна 34 кг/м³, а на предельной минимальной плотности на выходе из дополнительного модуля (227 кг/м³) разность плотностей была равна 9 кг/м³.

Эффект дополнительного модуля очевиден из приведенных данных, и он может быть интерпретирован так: модуль способен завершить процессы дегидратации вермикулита без ущерба для качества его вспучивания. При этом, за счет более коротких электрифицированных модулей, потребляемая ими энергия снижается на 10...14 %, а производительность, из-за снижения времени движения компонентов в печи, возрастет на 8...10 %.

Здесь энергия, запасенная в песочно-каменистом материале и зернах флогопит-вермикулита в дополнительном модуле, эффективно работает даже в условиях разбегания под действием сил тяжести частиц.

На рис. 6 показаны конечные продукты разрабатываемой технологии: оливин-пироксен-новые породы, сунгулит и вспученный вермикулит.

Заключение

Таким образом, технология переработки сунгулитовых конгломератов, созданная в горном институте Кольского научного центра, может быть дополнена их термообработкой в энерготехнологических агрегатах на основе электрических модульно-спусковых печей с дополнительным модулем с подвижной платформой и последующими операциями разделения компонентов сырьевого материала.

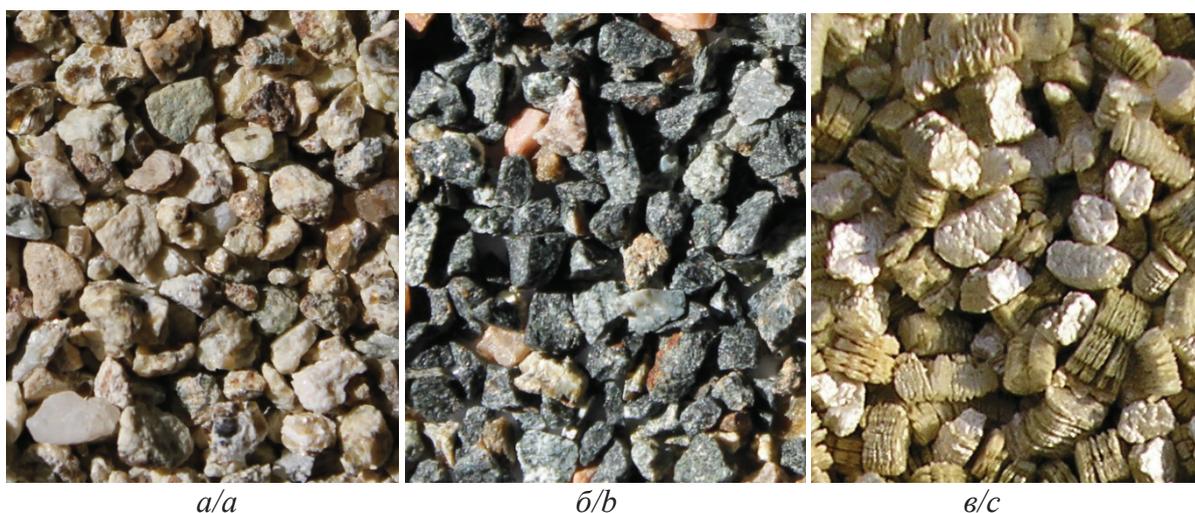


Рис. 6. Конечные продукты технологии (фотографии): а) оливин-пироксеновые породы, б) сунгулит, в) вермикулит

Fig. 6. Ultimate products of the technology (photography): а) olivine-pyroxene rocks, б) sungulite, в) vermiculite

Эффективность модуля с подвижной платформой, встроенного в печь с относительно короткими модулями обжига, должна быть еще выше, так как зерна и частицы конгломерата движутся в нем плотным потоком без образования пустот и зазоров. Поэтому лучистый теплообмен между ними будет происходить максимально интенсивно.

Это новое техническое решение может найти применение на предприятиях горной промышленности при переработке техногенных отходов, а в некоторых случаях электрические печи могут стать основой масштабной технологии термоактивации

серпентиновых минералов и производства вспученного вермикулита. Тем более что применение таких агрегатов для вспучивания вермикулита имеет уже десятилетнюю историю.

Статья подготовлена при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках научного проекта С1–11374 (Договор № 1243 ГС 1/21693).

Исследования выполнены в Национальном исследовательском Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аморфизация серпентиновых минералов в технологии получения магнезиально-силикатного реагента для иммобилизации тяжелых металлов / И.П. Кременецкая, А.Т. Беляевский, Т.Н. Васильева, О.П. Корытная, Т.И. Макарова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2010. – № 18. – С. 41–49.
2. О процессе форстеритообразования при нагревании дунита / П.П. Будников, Л.Б. Хорошавин, В.А. Перепелицин и др. // Журнал прикладной химии. – 1967. – № XL. – № 6. – С. 1369–1370.
3. Мчедлов-Петросян О.П. Серпентинитовый цемент // Сборник научных работ по химии и технологии силикатов. – М.: Государственное издательство литературы по строительным материалам, 1956. – С. 153–166.
4. Способ очистки воды открытых водоемов от закисления и ионов тяжелых металлов: пат. № 2136608 Рос. Федерация № 98106699/25; заявл. 09.04.98; опубл. 10.09.99, Бюл. № 25. – 3 с.
5. Кременецкая И.П., Корытная О.П., Васильева Т.Н. Реагент для иммобилизации тяжелых металлов из серпентинсодержащих вскрышных пород // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2008. – № 4. – С. 33–40.
6. Mucahit Sutçun. Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks // Ceramics International. – 2015. – V. 41. – P. 2819–2827.
7. Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and used / Chief ed. J.E. Kogal. – Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2006. – 1529 p.
8. Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – a short guide for Civil Engineer // Construction and Building Materials. – 2016. – V. 125. – P. 53–62.
9. 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.
10. Направления комплексного использования отходов добычи флогопита / С.В. Терещенко, С.А. Алексеева, Е.Д. Рухленко, И.П. Кременецкая, С.В. Бастрыгина, Л.А. Иванова // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли: сборник докладов Всеросс. науч.-техн. конф. В 2 т. – Апатиты; СПб.: Реноме, 2014. – Т. 1. – С. 272–279.
11. Звездин А.В. К технологии получения сунгулитовых и вермикулитовых концентратов из вскрышных пород Ковдорского флогопит-вермикулитового месторождения // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 8. – С. 93–99.
12. Нижегородов А.И. Опыт эксплуатации электрических модульно-спусковых печей различных модификаций для обжига вермикулитовых концентратов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2014. – № 9. – С. 27–34.
13. Электрическая печь с вибрационной подовой платформой: пат. № 166554 Рос. Федерация № 2015155496/02, заявл. 23.12.2015, опубл. 27.11.2016, Бюл. № 33. – 2 с.
14. Weaver W. Jr, Timoshenko S.P., Young D.H. Vibration Problems in Engineering. – New York: Wiley-Interscience, 1990. – 624 p.
15. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F.P. Incropera et al. – New York: John Wiley & Sons Edition, 2007. – 999 p.
16. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1984. – 455 с.
17. Hombostel C. Construction Materials: Types, Uses, and Applications. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991. – 1040 p.
18. Нижегородов А.И. Электрические модульно-спусковые печи с системой рекуперации энергии для обжига вермикулитовых концентратов // Новые огнеупоры. – 2015. – № 10. – С. 22–27.
19. Sevim İşçi, Yavuz İşçi. Characterization and comparison of thermal & mechanical properties of vermiculite polyvinylbutyral nanocomposites synthesized by solution casting method // Applied Clay Science. – 2017. – V. 151. – P. 189–193.
20. Sevim İşçi. Intercalation of vermiculite in presence of surfactants // Applied Clay Science. – 2017. – V. 146. – P. 7–13.

Поступила 30.01.2018 г.

Информация об авторах

Нижегородов А.И., доктор технических наук, профессор кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем Иркутского национального исследовательского технического университета.

Гаврилин А.Н., кандидат технических наук, доцент отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мойзес Б.Б., кандидат технических наук, доцент отделения контроля и диагностики Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.784:622'17

APPLICATION AND PRODUCTION TECHNOLOGY OF THERMAL ACTIVATION PRODUCTS OF SERPENTINE MINERALS FROM INDUSTRIAL WASTES

Anatoly I. Nizhegorodov¹,
nastromo_irkutsk@mail.ru

Alexey N. Gavrilin²,
tom-gawral@list.ru

Boris B. Moyzes²,
mbb@tpu.ru

¹ Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov Avenue, Irkutsk, 664074, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Serpentine minerals, in large quantities contained in mining waste, are part of vermiculite. Singulite is a specimen of serpentine materials as well as expanded vermiculite. They both are applied in environmental technologies: the first one is applied for detoxification of technologically contaminated lands and water bodies, the second one is applied for soil formation. Expanded vermiculite is also widely used in metallurgy, construction and other industries. So, it is necessary to search for development of technologies and equipment to obtain these materials.

The aim of the research is to develop a technology for electric thermal activation of the sungulite in power technological units while burning pre-enriched conglomerates obtained from mining wastes, which contain sungulite, vermiculite and olivine-pyroxene rocks.

Methods. The research method is based on the improvement of the technology for sungulite conglomerates converting by adding into the technological process the heat-treatment of upgraded electric modular-trigger furnaces. A module with a movable platform with an electric heater is fixed in the design of the furnaces.

Results. The results of the research based on upgrading the technology for thermal activation products of serpentine minerals from industrial wastes allowed developing the power technological units on the base of upgraded electric modular-trigger furnaces or furnaces with a vibrating bottom platform. This technology makes it possible to compensate partly the costs for heating the useless olivine-pyroxene rock and reduce the power capacity of the technological process. The efficiency of upgrading is proved by deficiency-free obtained materials. As a result, a promising technology for production of thermal activation products of serpentine minerals from industrial wastes is developed.

Key words:

Serpentine minerals, sungulite, vermiculite, raw conglomerate, thermal activation, heat energy, electric furnace, additional module.

The research was financially supported by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology within the science project C1–11374 (agreement no. 1243 FC 1/21693).

The research was carried out at National Research Tomsk Polytechnic University within the Program of TPU competitiveness enhancement among the leading world research centers.

REFERENCES

1. Kremenetskaya I.P., Belyaevsky A.T., Vasileva T.N., Korytnaya O.P., Makarova T.I. Amorfizatsiya serpentinovyykh mineralov v tekhnologii polucheniya magnezialno-silikatnogo reagenta dlya immobilizatsii tyazhelykh metallov [Amorphization of serpentine minerals in production of magnesia-silicate reagent for immobilization of heavy metals]. *Chemistry for Sustainable Development*, 2010, vol. 18, pp. 41–49.
2. Budnikov P.P., Khoroshavin L.B., Perepelitsin V.A. O protsesse forsteritobrazovaniya pri nagrevanii dunita [The process of forsterite formation when heating dunita]. *Journal of Applied Chemistry*, 1967, vol. XL, no. 6, pp. 1369–1370.
3. Mchedlov-Petrosyan O.P. Serpentinovyy tsement [Serpentine cement]. *Sbornik nauchnykh rabot po khimii i tekhnologii selikatoov* [Collection of scientific works on chemistry and technology of silicates]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatelstvo literatury po stroitelnyim materialam, 1956. pp. 153–166.
4. Makarov V.N., Kremenetskaya I.P. *Sposob ochistki vody otkrytykh vodoemov ot zakisljeniya i ionov tyazhelykh metallov* [Method of water purification from acidification and heavy metal ions in open waters]. Patent RF, no. 2136608, 1999.
5. Kremenetskaya I.P., Korytnaya O.P., Vasileva T.N. Reagent dlya immobilizatsii tyazhelykh metallov iz serpentinsoderzhashchikh vskryshnykh porod [Reagent for immobilization of heavy metals from serpentinerous overburden]. *Vodoочистка. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*, 2008, vol. 4, pp. 33–40.
6. Mucahit Sutcu. Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, pp. 2819–2827.
7. *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and used*. Chief ed. J.E. Kogal. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2006. 1529 p.
8. Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – a short guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 125, pp. 53–62.
9. Gershenkop A.Sh., Khokhulya M.S., Krashennnikov O.N., Bastygina S.V. Allocation of vermiculite concentrate from tailings of vermiculite ores and its use in heat-resistant concrete. *Gornyy zhurnal*, 2011, vol. 11, pp. 57–59. In Rus.

10. Tereshchenko S.V., Alekseeva S.A., Ruhlenko E.D., Kremetskaya I.P., Bastrygina S.V., Ivanova L.A. Napravleniya kompleksnogo ispolzovaniya otkhodov dobychi flogopita [Directions of comprehensive utilization of phlogopite waste]. *Ekologicheskaya strategiya razvitiya gornodobyvayushchey otrasli. Sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proc. of All-Russian scientific conference. Ekologicheskaya strategiya razvitiya gornodobyvayushchey otrasli]. Apatity; Saint-Petersburg, Renome Publ., 2014. vol. 1, pp. 272–279.
11. Zvezdin A.V. Technology for obtaining sungulite and vermiculite concentrates from overburden rocks of the Kovdor phlogopite-vermiculite deposit. *Vestnik ISTU*, 2015, vol. 8, pp. 93–99. In Rus.
12. Nizhegorodov A.I. Experience in operating electrical module and trigger different modifications of furnaces for burning vermiculite concentrates. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2014, vol. 9, pp. 27–34. In Rus.
13. Nizhegorodov A.I. *Elektricheskaya pech s vibratsionnoy podovoy platformoy* [Electric furnace with a vibrating floor platform]. Patent RF, no. 166554, 2015.
14. Weaver W. Jr, Timoshenko S.P., Young D.H. *Vibration Problems In Engineering*. New York, Wiley-Interscience, 1990. 624 p.
15. Incropera F.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York, John Wiley & Sons Edition, 2007. 999 p.
16. *Fizicheskie svoystva gornykh porod i poleznykh iskopaemykh (petrofizika). Spravochnik geofizika* [Physical properties of rocks and minerals (petrophysics). Handbook of Geophysics]. Chief ed. N.B. Dortmam. Moscow, Nedra Publ., 1984. 455 p.
17. Hombostel C. Vermiculite. *Construction Materials: Types, Uses, and Applications*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1991. 1040 p.
18. Nizhegorodov A.I. Elektricheskie modulno-spuskovye pechi s sistemoy rekuperatsii energii dlya obzhiga vermikulitovykh koncentratov [Electric module and trigger furnace with energy recovery system for burning vermiculite concentrates]. *Novye ogneupory*, 2015, vol. 10, pp. 22–27.
19. Sevim İşçi, Yavuz İşçi. Characterization and comparison of thermal & mechanical properties of vermiculite polyvinylbutyral nanocomposites synthesized by solution casting method. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 151, pp. 189–193.
20. Sevim İşçi. Intercalation of vermiculite in presence of surfactants. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 146, pp. 7–13.

Received: 30 January 2018.

Information about the authors

Anatoly I. Nizhegorodov, Dr. Sc., professor, Irkutsk National Research Technical University.

Alexey N. Gavrilin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Boris B. Moyzes, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.