

УДК 622.784:622'17

ИСПЫТАНИЯ НОВОЙ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА ВЕРМИКУЛИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Нижегородов Анатолий Иванович¹,
nastromo_irkutsk@mail.ru

Брянских Татьяна Борисовна¹,
broocha@yandex.ru

Гаврилин Алексей Николаевич²,
tom-gawral@list.ru

Мойзес Борис Борисович²,
mbb@tpu.ru

Градобоев Александр Васильевич²,
gava@tpu.ru

Вавилова Галина Васильевна²,
wgv@tpu.ru

Josef Tlustý³,
tlusty@fel.cvut.cz

Валерия Тузикова^{3,4},
tuzikval@fel.cvut.cz

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.

³ Чешский технический университет,
Чешская Республика, 16627, г. Прага, ул. Technická, 2.

⁴ Siemens, Energy Management,
Чешская Республика, 15500, г. Прага, Siemsenova, 1.

Актуальность. Одним из представителей георесурсов, нашедших широкое применение в различных сферах промышленности, является вермикулит. После обжига концентратов обогащенных вермикулитовых руд в пламенных печах получают вспученный вермикулит. Вспученный вермикулит, благодаря своей слоисто-пористой структуре и высокой отражательной способности, является основой для получения многих термоизоляционных и огнеупорных материалов и изделий, входит в состав строительных материалов, применяется для защиты от радиации. Обжиг вермикулитовых руд в пламенных печах является энергоемким процессом, поэтому активно разрабатываются конструкции электрических модульно-спусковых печей. Данные печи снизили удельную энергоемкость процесса обжига, в связи с этим работы по созданию электрических печей актуальны. В работе рассмотрены вопросы, связанные с созданием и испытанием новой альтернативной электрической печи для обжига вермикулитовых концентратов.

Цель исследования: экспериментальное определение энерготехнологических показателей опытного образца печи с вибрационной подовой платформой при его испытаниях.

Методы исследования: анализ источников информации в области исследования, синтез конструктивных решений, физическое моделирование, параметрическое и функциональное описание, экспериментальные исследования.

Результаты. Разработана альтернативная электрическая модульно-спусковая печь для обжига вермикулитовых концентратов с принципиально новой конструктивной структурой – печь с вибрационной подовой платформой. Создана полномасштабная физическая модель печного агрегата – однофазный одномодульный блок, на которой проведены эксперименты и получены эмпирические данные. При проведении экспериментальных исследований достигнута плотность вспученного вермикулита 90...91 кг/м³ и производительность 3,56 м³/ч. Значение удельной энергоемкости обжига вермикулита различных видов составляет 63,7...81,6 мДж/м³, что почти втрое меньше, чем у существующих пламенных печей, работающих на углеводородном топливе.

Ключевые слова:

Печь с вибрационной подовой платформой, опытный образец печи, электрическая модульно-спусковая печь, вермикулит, вермикулитовый концентрат, тепловая энергия, удельная энергоемкость обжига.

Введение

В спектре термоизоляционных и огнеупорных материалов и изделий значимое место занимают изделия на основе вспученного вермикулита, получаемого обжигом концентратов обогащенных вермикулитовых руд. Благодаря его слоисто-пористой структуре и высокой отражательной способности [1], такие изделия и материалы отличаются хорошими эксплуатационными свойствами. Поэтому они применяются для обмуровки тепловых агрегатов в энергетике, для повышения предела огнестойкости несущих конструкций и звукоизоляции в строительстве, для футеровки ванн электролизеров при производстве алюминия, для футеровки печей и сталеразливочных ковшей, для производства почвосмесей и гидропонического выращивания растений в агропромышленном секторе и ряде других отраслей экономики.

Кроме того, вспученный вермикулит является эффективным теплоизоляционным материалом, пористым наполнителем для легких бетонов; из него готовят сухие строительные смеси, в том числе огнезащитные, используют для фильтрации воды, в качестве адсорбента дыма и ядовитых газов, как противорадиационный материал и т. д. [1–3].

Обжиг вермикулита в пламенных печах – это энергоемкий процесс [4], но даже с появлением электрических модульно-спусковых печей различных модификаций [4–12] существенно понизить

удельную энергоемкость процесса не удавалось, пока не был разработан и построен опытный образец печи с принципиально иной, альтернативной конструктивной структурой [13, 14].

Печь с вибрационной подовой платформой. Прогноз энергоэффективности

Трехмодульная электрическая печь для обжига вермикулита показана на рис. 1. В корпусе печи – 1 размещена опорная рама – 2, на которой в направлении – 3 и катках – 4 установлена подвижная платформа – 5. Будучи подпружиненной с обеих сторон пружинами – 6, она образует колебательную систему, возбуждаемую за счет приводного двигателя толкателем – 7 и пружиной – 8. Пружины, установленные с правой стороны, – конического типа: они обеспечивают несимметричные колебания вибрационной платформы, при которых создается односторонний транспортный эффект, усиленный анизотропией поверхности – 9 подов – 10, выполненной из однонаправленного наложения фрагментов [15, 16]. Элементы подов – основания, крышки и боковые стенки сделаны из жаростойкой стали и термоизолированы муллитокремнеземистым войлоком.

Вермикулитовый концентрат (или другие сыпучие минералы, подвергаемые термоактивации) поступает на конвейер – 11 и с помощью сбрасывателей – 12 подается в бункеры дозаторов – 13, а затем в пространство модулей обжига – а, подклю-

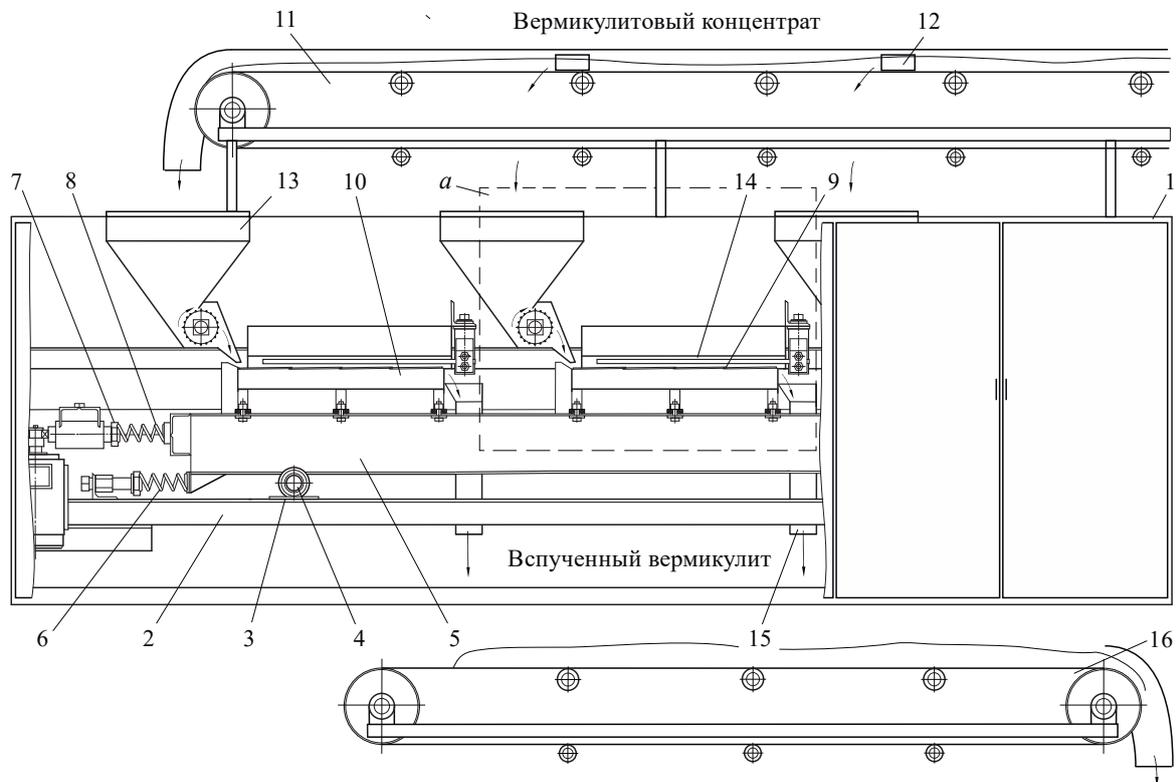


Рис. 1. Трехмодульная электрическая печь с вибрационной платформой

Fig. 1. Three-module electric furnace with vibration platform

ченных каждый к своей фазе электрической сети. При движении слева направо концентрат проходит под электрическими нагревателями – 14, вспучивается и ссыпается по лоткам – 15 на нижний ленточный конвейер – 16. Поды служат основаниями для размещения вермикулита. С помощью управляемого по амплитуде и частоте вибрационного механизма вспучивающийся материал может перемещаться с различной скоростью и подвергаться термообработке заданное время – 2,7...3,5 с.

При вибрационном транспортировании [13, 14], в отличие от гравитационного спуска в модульно-спусковых печах [11, 12], зерна вермикулита располагаются на поверхностях подов с практически нулевым зазором, образуя сплошное покрытие их оснований. Не покрытыми остаются лишь межзерновые пустоты, занимающие 25...40 % общей площади, поэтому здесь более 60 % эффективных и отраженных потоков лучистой энергии поглощается вермикулитом.

Прогнозы, сделанные в работе [17], показывают, что печи с вибрационной платформой способны обеспечить обжиг вермикулита с удельной энергоемкостью 40...45 МДж/м³, тогда как в электрических модульно-спусковых печах минимальное значение этого показателя составляет ~170 МДж/м³, а в пламенных – 230...260 МДж/м³. Так как электроэнергия в большинстве регионов страны обходится дороже, чем энергия сжигаемого топлива, это новое техническое решение делает выгодным применение таких печей. Кроме того, они отличаются экологической и промышленной безопасностью, а их использование не ограничивается только обжигом вермикулита: они могут применяться и для термоактивации различных минералов [18–20].

Физическая модель

Физическая модель печи (рис. 1) создана в масштабе 1:1 (рис. 2). Модель выполнена как самостоятельный одиночный однофазный агрегат. Он содержит крепежные головки – 1, удерживающие консольно установленные электрические нагреватели из ленточного нихрома – 2 над поверхностью подовой плиты – 3, закрепленной на вибрационной платформе – 4, установленной в подшипниках – 5. Благодаря эксцентриковому виброприводу (на рис. 2 не показан), действующему на толкатель – 6, его колебания передаются через пружину – 7, возбуждая резонанс платформы. За счет изменения частоты возбуждения с помощью частотного регулятора возможно управление амплитудой колебаний, скоростью вибротранспортирования и временем обжига вермикулита.

Барабанным дозатором (на рис. 2 не показан) вермикулитовый концентрат по лотку – а подается в пространство обжига под нагреватели – 2. Двигаясь в тепловом поле, вермикулит вспучивается и выходит наружу по лотку – b (на виде сверху лоток b условно снят). Платформа и нагревательная система модуля смонтированы на раме – 8.

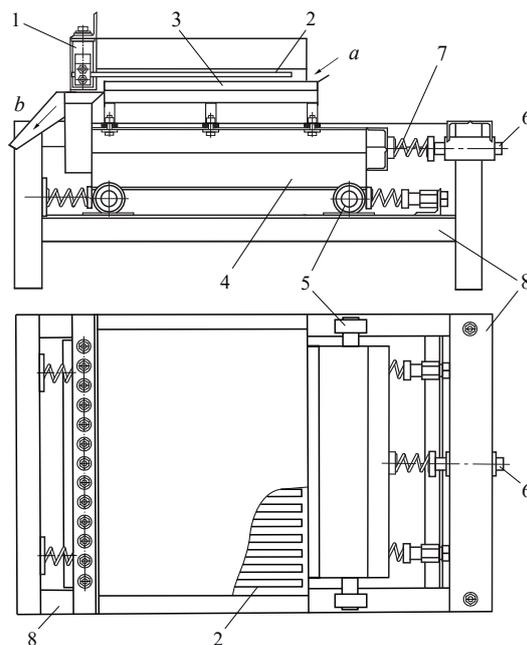


Рис. 2. Самостоятельный одиночный однофазный агрегат для обжига вермикулита (физическая модель)

Fig. 2. Self-contained separate and single-phase unit for vermiculite heat treatment (physical model)

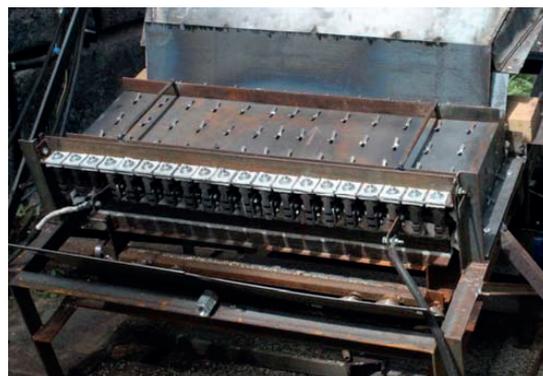


Рис. 3. Физическая модель – одиночный однофазный модуль (вид со стороны крепежных головок)

Fig. 3. Physical model – a separate single-phase module (the fastening heads side-view)



Рис. 4. Выход вспученного вермикулита из пространства обжига (на переднем плане – крепежные головки)

Fig. 4. Yield of the expanded vermiculite from the firing space (the fixing heads are in the foreground)

На рис. 3 показана фотография физической модели печи – одиночного однофазного модуля обжига (вид со стороны крепежных головок). Для увеличения скорости движения вермикулита рама агрегата установлена под углом к горизонту.

На рис. 4 показан выход вспученного вермикулита из пространства обжига модуля. На переднем плане – крепежные головки и электрические нагреватели из ленточного нихрома.

Экспериментальные исследования

Одиночный модуль соединялся по схеме «звезда» с общей не зануляемой точкой с двумя балластными сопротивлениями, которые равны электрическому сопротивлению последовательно соединенных нагревательных элементов модуля и выполнены из того же материала. Нагреватели установлены на ребро с регулируемым зазором 8...9 мм между ними и подом. Для управления электрической мощностью модуля использовался тиристорный регулятор ТРМ-3–125, способный изменять мощность нагревательной системы фазовым способом. По индикатору регулятора выставлялся ток уставки (предельное значение 125 А), фиксировался процент загрузки по мощности, а действующие значения силы тока I и напряжения U в цепи нагревателей модуля определялись специальным прибором «Sonel» PQM-701.

Так как нагрузка испытуемого образца исключительно активная, мощность рассчитывалась по формуле:

$$N=I \cdot U.$$

При проведении экспериментов решались следующие задачи:

- с помощью частотного регулятора и привода дозатора подобрать подачу концентрата, при которой вспучивающийся вермикулит двигался бы по поверхности пода в один слой и без зазоров между зернами;
- при проведении измерений поддерживать неизменной частоту колебаний платформы – 7,68 Гц, что соответствует частоте регулятора привода виброплатформы 23,4 Гц;
- подобрать температурный режим термообработки вермикулита, который обеспечивал бы постоянную производительность при постоянной плотности вспученного материала;
- определить значение удельной энергоёмкости обжига вермикулитового концентрата в установленном режиме работы одиночного модуля.

При проведении испытаний опытного образца использовался концентрат Кокшаровского месторождения вермикулитовых руд «Medium» (Приморский край). В таблице приведены его основные характеристики [21, 22].

Подача дозатора и производительность печи по вспученному вермикулиту связаны через коэффициент вспучивания:

$$\Pi_g = \Pi_v k,$$

где Π_g – подача концентрата в печь, кг/с; Π_v – объемная производительность печи, м³/с; k – коэффициент вспучивания, м³/кг.

Таблица. Характеристики сырья

Table. Characteristics of raw materials

Параметры концентрата/Parameter description	«Medium»
Крупность основной фракции, мм Size of the main fraction, mm	5,0±2,0
Содержание вермикулита, %, не менее Content of vermiculite, %, not less	90
Объемный вес концентрата до обжига, кг/м ³ Volume weight of concentrate before roasting, kg/m ³	950...1150
Насыпная плотность вермикулита после обжига, кг/м ³ Bulk density of vermiculite after roasting, kg/m ³	90...110

При проведении опытов подача подбиралась так, чтобы во вспученном состоянии материал двигался по поверхности пода вибрационной платформы однослойным потоком практически без интервалов между зернами.

Предварительно разогревались электрические нагреватели, и стальная плита пода в течение 30 минут при токе уставки 110 А. Температура на нихроме составляла 967 °С, на плите – 796 °С. Измерение температур проводилось с помощью термомпары пирометра DT-8835 с точностью ±1,5 % в диапазоне 50...1000 °С.

Пробный пуск дозатора на частоте регулятора 45 Гц показал избыточность подачи: образовался частично двухслойный поток вермикулита. Частота в обмотках электродвигателя мотор-редуктора была снижена до 40 Гц, что с учетом угловой скорости вращения вала (2,84 об/мин) при передаточном числе клиноременной передачи (0,283) составило 0,8 об/мин барабана дозатора.

При повторном запуске началось однослойное движение и качественное вспучивание вермикулита, однако процесс сопровождался налипанием мелкодисперсных частиц на поверхности подовой плиты и нагревателей, что свидетельствовало о чрезмерно высокой температуре. Выходящие вспученные зерна имели красноватый цвет, указывающий на химико-минералогическое преобразование вермикулита в энстатит, характеризующийся низкой прочностью и хрупкостью [23].

Второй режим был выбран по температуре подовой плиты и задан 725 °С. Нагрев нихрома составил 871 °С, ток уставки – 91 А, действующие значения тока и напряжения – 72,7 А и 148 В, а потребляемая электрическая мощность – 10760 Вт. подача сырья соответствовала 0,8 об/мин барабана дозатора.

Объем вспученного вермикулита, вышедшего из модуля за 60 с, был измерен – 11,9 л, а часовая производительность составила 0,71 м³/час.

В этом опыте было определено время движения вермикулита путем вбрасывания меток – увлажненных бумажных окатышей. Среднее по шести замерам время составило 3,31 с,

Через девять минут с начала работы модуля было замечено снижение насыпной плотности вермикулита, одновременно уменьшалась и производительность (до 0,61 м³/час). За это время температура нагревателей снизилась в среднем на 68 °С, а температура подовой плиты – на 80 °С.

Третий режим был выбран заведомо заниженным по температуре, чтобы оценить, как быстро будет уменьшаться плотность вермикулита и производительность модуля. При токе уставки 68,5 А, действующих значениях тока и напряжения 52,8 А и 104,5 В, потребляемой мощности 5518 Вт температуры подовой плиты и нихрома составили 649 и 740 °С соответственно. Сырье подавалось при 0,8 об/мин барабана дозатора.

Увеличение плотности вермикулита происходило еще быстрее, производительность за то же время уменьшилась от 0,62 до 0,48 м³/ч, температуры нагревателей и подовой плиты снизились на 125 на 214 °С соответственно.

В начале второго и третьего режимов вермикулит вспучивался за счет теплоты, накопленной в массивной подовой плите в условиях недостаточной мощности источника энергии, что приводило к быстрому охлаждению нагревателей и пода и к нарастанию его насыпной плотности.

Зависимости на рис. 5 указывают на то, что с течением времени поглощаемая вермикулитом тепловая мощность будет сбалансирована с мощностями теплового излучения и тепловых потерь, но качество его вспучивания, определяемое насыпной плотностью, будет низким, что неприемлемо.

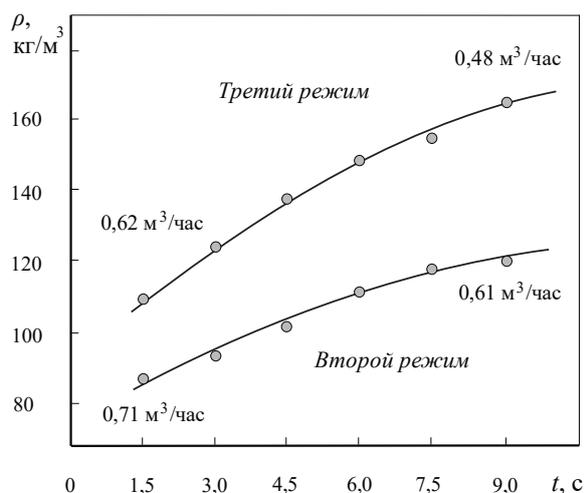


Рис. 5. Повышение насыпной плотности вспученного вермикулита в условиях недостаточной мощности источника энергии

Fig. 5. Increase of poured density of expanded vermiculite at insufficient power of energy source

Следующий эксперимент проводился в условиях корректировки электрической мощности одиночного модуля за счет тиристорного регулятора.

Началу процесса обжига (рис. 6, линия 1) соответствовали следующие настройки: ток уставки 93 А, действующее значения тока $I=87,8$ А, напряжения $U=179,1$ В и потребляемая электрическая мощность 15725 Вт. Подача концентрата соответствовала 0,8 об/мин барабана дозатора. Температура подовой плиты 737 °С, температура нихрома 880 °С.

Вермикулитовый концентрат вспучивался качественно: была достигнута плотность 84 кг/м³ при производительности 0,717 м³/ч. Зерна вермикулита на подовой плите двигались сплошным потоком почти без зазоров, но плотность повышалась и на пятнадцатой минуте (900 с) преодолела значение 102 кг/м³ без заметных признаков стабилизации в диапазоне плотностей, заданном в таблице.

На шестнадцатой минуте (960 с) параметры процесса были изменены (рис. 6, линия 2): ток уставки 100 А, действующие значения тока 96,6 А, напряжение 195,8 В, мощность 18914 Вт при неизменной подаче. Температура нагревателей изменилась за несколько секунд и показала значение ~907 °С. Температура платформы из-за тепловой инерции не измерялась.

На двадцать седьмой минуте (1620 с) (рис. 6) было отмечено локальное снижение плотности, но затем тренд увеличения плотности восстановился до стабилизации вблизи значения 110 кг/м³.

Этот результат нельзя было считать удовлетворительным, так как плотность находилась на верхнем пределе заданного в таблице диапазона. Поэтому на сорок шестой минуте (2760 с) параметры процесса были вновь изменены (рис. 6, линия 3): ток уставки 104 А, действующие значения тока 100,2 А, напряжение 208,0 В, потребляемая мощность 20842 Вт. Обороты барабана не менялись. Уже через три минуты плотность начала снижаться, а на семьдесят пятой минуте (4500 с) практически стабилизировалась при плотности ~92...93 кг/м³. Средняя температура на поверхностях нагревателей, измеренная термопарой-щупом, составила 926 °С.

Так как плотность установилась вблизи нижней границы регламентированного диапазона (таблица), этот режим следует признать штатным для данного одиночного модуля, тем более что производительность на 92 минуте (5520 с) работы составила 0,693 м³/ч.

Таким образом, можно принять следующие контрольные значения температур при обжиге концентратов Кокшаровского месторождения пятой размерной группы:

- нижний предел – 850 °С;
- верхний предел – 940 °С.

Предельно допустимую температуру нихрома следует ограничить значением 950 °С.

Удельная энергоёмкость обжига концентрата «Medium» составила, Дж/м³:

$$e = \frac{N \cdot 3600}{\Pi_v} = \frac{20842 \cdot 3600}{0,693} = 108270121,$$

где N – потребляемая электрическая мощность, Вт; Π_v – объемная производительность, м³/ч.

Полученный результат не окончательный и требует уточнения, так как здесь не учитываются изменения, внесенные в конструкцию исследуемой физической модели.

При первом испытании однофазного одиночного модуля выявилось, что штатные короткие, консольно закрепленные нагревательные элементы

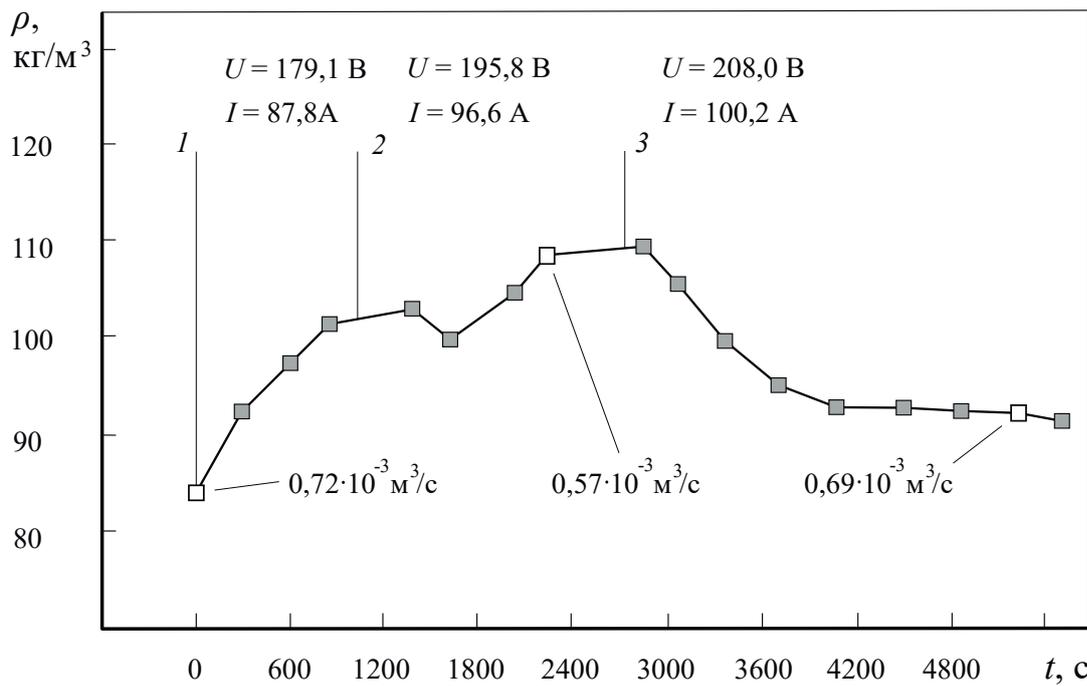


Рис. 6. Изменение насыпной плотности вермикулита в процессе корректировки мощности одиночного однофазного агрегата

Fig. 6. Change in vermiculite poured density when adjusting separate single-phase unit power

(рис. 2) при разогреве прогибались, что могло привести к электрическому замыканию. Поэтому они были заменены на другие – удлиненные, выходящие за пределы пода, а их консоли оперты на огнеупорные кирпичи.

На рис. 7 показана установка нагревателей – 1 с закреплением на головках – 2 и опиранием их консолей на огнеупорные кирпичи – 3, выложенные на дополнительной раме. Длина нагревателей стала существенно больше. Если зазор δ_1 равен

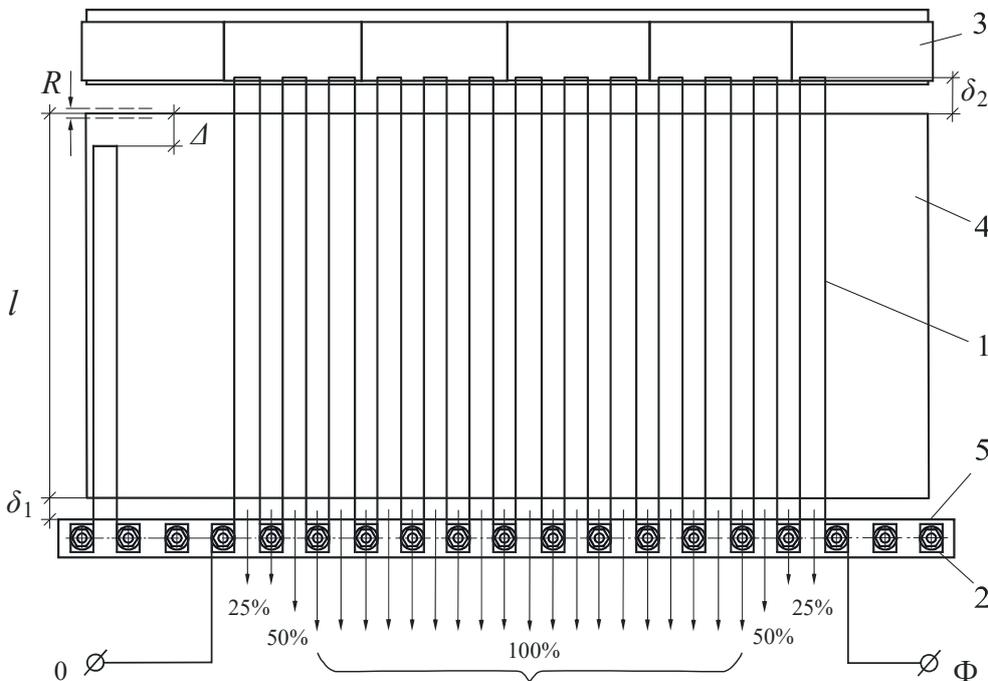


Рис. 7. Схема одиночного модуля с удлиненными нагревателями и опертыми консолями

Fig. 7. Single module design with elongated heaters and supported consoles

20 мм, и он исключает контакт подовой плиты – 4 во время колебаний с размахом R с панелью головок – 5, то длины консольных участков, выходящих за пределы платформы δ_2 , равны 45 мм. При длине пода 400 мм полная длина нагревателя, так как он П-образный, составила 0,96 м, но это в холодном состоянии. При нагреве до рабочих температур она увеличивалась еще на 7...8 мм, и размер нагревателя становился равным 0,976 м.

На консолях тепловая энергия теряется, приводя к перерасходу электроэнергии. Если бы консоли нагревателей соответствовали длине подовой плиты, то длина каждого из них составила бы 0,87 м. Разность длин – 0,106 м, это 10,9 % от исходных 0,976 м, следовательно, мощность всех нагревателей будет меньше на те же 10,9 % и составит 18570 Вт.

При установке удлиненных нагревателей их количество уменьшилось от штатных 18 шт. до 13 и на один укороченный нагреватель приходится мощность 18570/13=1428 Вт. Общее количество полос нихрома, образующих продольные камеры, вдоль которых движется вермикулит, равно 26 шт. Наблюдение за выходом вспученного вермикулита из печи (рис. 4) показало, что только 19 камер заполнены полностью без зазоров между зернами. По одной камере слева и справа заполнены примерно на 50 %, еще по две с обеих сторон на ~ 25 %. Если эти шесть камер привести к двум заполненным, то количество полноценно работающих камер будет 21 и по одному нагревателю с каждой стороны можно отключить от сети (рис. 7). Тогда потребляемая электрическая мощность снизится до величины:

$$N_1 = \frac{11}{13} \cdot 18570 = 15713 \text{ Вт},$$

а удельная энергоемкость для Кокшаровского концентрата «Medium» будет равна:

$$e = \frac{N \cdot 3600}{\Pi_v} = \frac{15713 \cdot 3600}{0,693} = 81625971 \text{ Дж/м}^3.$$

Следует учесть, что упомянутый выше показатель энергоемкости модульно-спусковых печей – 170 мДж/м³, получен при обжиге Ковдорских концентратов. Температура нагревателей при обжиге в модульно-спусковой печи Кокшаровского вермикулита составляет 1043...1103 °К, тогда как при обжиге Ковдорского концентрата достаточно температуры 993...1033 °К [24]. Поэтому был сделан пересчет температур и соответствующей им электрической мощности. Для Кокшаровского вермикулита примем среднее значение 1078 °К, для Ковдорского – 1013 °К. Используя зависимость между мощностью теплового излучения и абсолютной температурой T (°К) разогретого тела [1]:

$$N = \sigma T^4 f,$$

σ – постоянная Стефана–Больцмана; f – площадь излучающей поверхности; N – мощность теплового излучения, Вт, получим соотношение:

$$\frac{N_0}{N} = \frac{T_0^4}{T^4} = \frac{1013^4}{1078^4} = 0,78,$$

где N_0 и N – мощность модульно-спусковой печи при обжиге Ковдорского и Кокшаровского концентратов соответственно; T_0 и T – соответствующие температуры, °К.

Получаем эквивалентное снижение потребляемой мощности на 22 %, следовательно, при обжиге Ковдорского вермикулита удельная энергоемкость была бы существенно ниже и равна:

$$e = \frac{N \cdot 3600}{\Pi_v} = \frac{15713 \cdot 0,78 \cdot 3600}{0,693} = 63668259 \text{ Дж/м}^3.$$

При примерно равных коэффициентах вспучивания ($\kappa_v \sim 8,6...9,2$) [23] полученный результат является окончательным – 63,7 мДж/м³, а прогнозы, сделанные в работе [9] по печам с вибрационной платформой, можно считать состоявшимися.

Если производительность одиночного модуля составляет 0,693 м³/ч, то трехмодульная печь с той же шириной подовой плиты ($B=0,96$ м) будет иметь производительность, м³/ч:

$$\Pi_{v1} = 3 \frac{36}{21} \cdot 0,693 = 3,56,$$

где 36 – общее количество заполненных вермикулитом продольных камер в каждом из модулей. При этом потребляемая таким агрегатом мощность составит 63 кВт.

Следует еще учесть и то, что обжигу подвергался Кокшаровский вермикулит (рис. 8, а) пятой размерной группы, а упомянутые выше данные удельной энергоемкости – 170 мДж/м³, получены при обжиге концентрата четвертой размерной группы Ковдорского (рис. 8, б) относительно мелкого вермикулита.

Еще одним важным результатом проведенных экспериментов было установление зависимости насыпной плотности вермикулита от температуры его нагрева, позволяющей уточнить аналитическую модель теплоусвоения, разработанную ранее [24].

Новая конструкция электрической печи с вибрационной подовой платформой отличается тем, что концентрация вспученного материала на поверхности подовой плиты в семнадцать раз больше, чем в модульно-спусковых печах [4, 5]. Высокая концентрация вермикулита позволила получить сплошную поверхность из вермикулитовых зерен и измерить их температуру.

В установившемся тепловом режиме при средней плотности вспученного продукта ~ 92 кг/м³ была зафиксирована средняя по нескольким измерениям температура 512 °С. При этом температура поверхности нихромовых нагревателей составляла в разных точках 718...776 °С при среднем значении 747 °С.

Минимальная плотность вспученного Ковдорского вермикулита четвертой размерной группы, которая неоднократно достигалась в процессе производства на электрической модульно-спусковой



Рис. 8. Вермикулит: а) Кокшаровский; б) Ковдорский

Fig. 8. Vermiculite: a) Koksharovsky; b) Kovdorsky

печи, составляет $\sim 86 \text{ кг/м}^3$. Экстраполируя полученную кривую (рис. 9) в область более высоких температур, получаем предельную точку с температурой 545°C . Очевидно, что в этой точке состояние вспученных зерен соответствует полной дегидратации и максимальному вспучиванию. Чтобы повысить точность построения кривой добавлена дополнительная точка, соответствующая образованию энстатита.

Опыты показали, что в процессе обжига вермикулита его температура не сравнивается с температурой нагревательных элементов, как это ранее

предполагалось при построении первой аналитической модели теплоусвоения вермикулита [24, 25]. Поэтому новую, уточненную модель теплоусвоения следует откорректировать, но это тема другого исследования.

Заключение

Предполагаемое прогнозируемое значение удельной энергоемкости обжига вермикулита $40\text{--}45 \text{ мДж/м}^3$, с учетом того, что обжигу подвергался Кокшаровский более крупный концентрат, практически достигнуто. Новую электрическую печь с вибрацион-

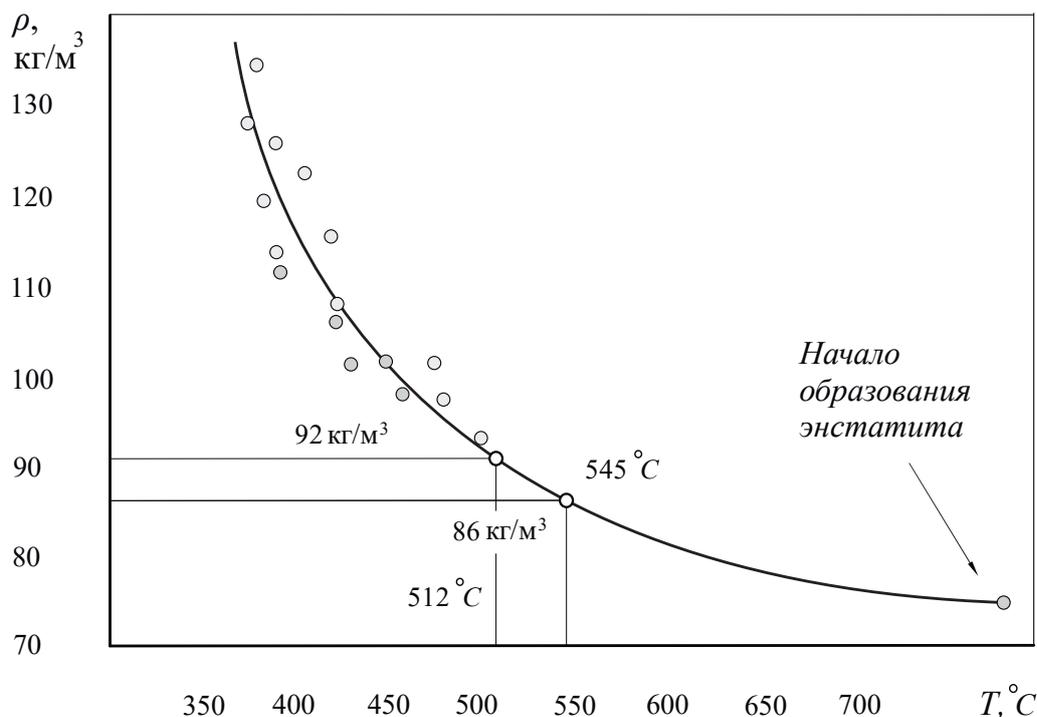


Рис. 9. Зависимость насыпной плотности вспученного вермикулита от температуры его нагрева

Fig. 9. Dependence of expanded vermiculite bulk density on temperature of its heating

ной подовой платформой по праву можно назвать высоко энергоэффективной, так как она по своим энергетическим характеристикам значительно превосходит не только пламенные печи (230...260 МДж/м³), но и наиболее совершенные электрические модульно-спусковые печи, в том числе с дополнительными неэлектрифицированными «нулевыми» модулями (170 МДж/м³) [24]. При примерно равных габаритных размерах она

обладает производительностью почти в три раза превышающей производительность модульно-спусковых печных агрегатов.

Для создания инженерной методики расчета таких печей необходимо математическое моделирование процессов теплопереноса и теплоусвоения вермикулита в рабочем пространстве электрических модулей. Эти исследования уже проводятся авторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nizhegorodov A.I., Zvezdin A.V., Bryanskikh T.B. Analytical model of absorption-reflection properties of vermiculite under thermal // *Refractories and industrial ceramics*. – 2017. – V. 57. – № 1. – P. 19–24. DOI: 10.1007/s11148-017-0047-6.
2. Ахтямов Р.Я. Вермикулит – сырье для производства огнеупорных теплоизоляционных материалов // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2009. – № 1-2. – С. 59–64.
3. Mucahit Sutçun. Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks // *Ceramics International*. – 2015. – V. 41. – P. 2819–2827.
4. Effects of humic acid on phthalate adsorption to vermiculite / Zhi-Dan Wen, Da-Wen Gao, Zhe Li, Nan-Qi Ren // *Chemical Engineering Journal*. – 2013. – V. 223. – P. 298–303.
5. Development and thermochemical characterizations of vermiculite/SrBr₂ composite sorbents for low-temperature heat storage / Y.N. Zhang, R.Z. Wang, Y.J. Zhao, T.X. Li, S.B. Riffat, N.M. Wajid // *Energy*. – 2016. – V. 115. – P. 120–128.
6. Jun Kariya, Junichi Ryu, Yukitaka Kato. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 94. – P. 186–192.
7. Effect of the temperature on the structural and textural properties of a compressed K-vermiculite / F. Balima, An-Ngoc Nguyen, L. Reinert, S. Le Floch, V. Pischedda, L. Duclaux, A. San-Miguel // *Chemical Engineering Science*. – 2015. – V. 134. – P. 555–562.
8. *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and used* / Ed. by J.E. Kogal. – Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2006. – 1529 p.
9. Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – a short guide for Civil Engineer // *Construction and Building Materials*. – 2016. – V. 125. – P. 53–62.
10. Nizhegorodov A.I. Production of Foamed Vermiculite from Conglomerates in Modular-Pouring Electric Furnaces // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2016. – V. 57. – № 1. – P. 13–17. DOI: 10.1007/s11148-016-9918-5.
11. Sevim İşçi. Intercalation of vermiculite in presence of surfactants // *Applied Clay Science*. – 2017. – V. 146. – P. 7–13.
12. 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.
13. Nizhegorodov A.I. Electrical roasting system with vibrational batch supply // *Russian engineering research*. – 2016. – V. 37. – № 3. – P. 180–184. DOI: 10.3103/S1068798X17030170.
14. Брянских Т.Б. Трехмодульная электрическая печь для обжига вермикулита и других сыпучих материалов с вибрационной подачей сырья // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2016. – № 5. – С. 10–18.
15. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. – М.: Высшая школа, 1977. – 255 с.
16. Weaver W. Jr., Timoshenko S.P., Young D.H. *Vibration Problems in Engineering*. – New York: Wiley-Interscience, 1990. – 624 p.
17. Incropera F.P. et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. – New York: John Wiley & Sons Edition, 2007. – 999 p.
18. Marcos C., Menendez R., Rodriguez I. Thermoexfoliated and hydrophobized vermiculites for oleic acid removal // *Applied Clay Science*. – 2017. – V. 150. – P. 147–152.
19. Амorfизация серпентиновых минералов в технологии получения магнезиально-силикатного реагента для иммобилизации тяжелых металлов / И.П. Кременецкая, А.Т. Беляевский, Т.Н. Васильева и др. // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2010. – № 18. – С. 41–49.
20. Osman M.A. Organo-vermiculites: Synthesis, structure and properties. Platelike nanoparticles with high aspect ratio // *Journal of Materials Chemistry*. – 2006. – V. 16. – № 29. – P. 300–3013. DOI: 10.1039/b606036f.
21. Приморский вермикулит. URL: http://www.primver.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=4&lang=ru (дата обращения 11.01.2018).
22. Hombostel C. *Construction Materials: Types, Uses, and Applications*. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991. – 1040 p.
23. Подоляк Ф.С. Сравнительная эффективность печей для обжига вермикулита // *Строительные материалы*. – 1973. – № 7. – С. 9–11.
24. Нижегородов А.И., Звездин А.В. Энерготехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2015. – 250 с.
25. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent / A. Schackow, C. Effting, V.M. Folgueras, S. Güths, A.G. Mendes // *Construction and Building Materials*. – 2014. – V. 57. – P. 190–197.

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.

Брянских Т.Б., аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета.

Гаврилин А.Н., кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения и промышленной робототехники Школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мойзес Б.Б., кандидат технических наук, доцент кафедры физических методов и приборов контроля качества Школы неразрушающего контроля и безопасности Томского политехнического университета.

Градобоев А.В., доктор технических наук, профессор кафедры физических методов и приборов контроля качества Школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Вавилова Г.В., кандидат технических наук, доцент кафедры физических методов и приборов контроля качества Школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Plusty J., PhD, профессор факультета электротехники, заместитель декана факультета Чешского технического университета.

Тузикова В., аспирант Чешского технического университета; технический торговый представитель Siemens, Energy Management.

UDC 622.784:622'17

TESTING A NEW ALTERNATIVE ELECTRIC FURNACE FOR VERMICULITE CONCENTRATES HEAT TREATMENT

Anatoly I. Nizhegorodov¹,
nastromo_irkutsk@mail.ru

Tatiana B. Bryanskikh¹,
broocha@yandex.ru

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

Boris B. Moyzes²,
mbb@tpu.ru

Alexander V. Gradoboev²,
gava@tpu.ru

Galina V. Vavilova²,
gava@tpu.ru

Josef Tlustý³,
tlusty@fel.cvut.cz

Valeriya Tuzikova^{3,4},
tuzikval@fel.cvut.cz

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

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

³ Czech Technical University,
2, Technická street, Prague, 16627, Czech Republic.

⁴ Siemens, Energy Management,
1, Siemensova street, Prague, 15500, Czech Republic.

Relevance. Vermiculite is one of the representatives of geo-resources that are widely used in various industries. The expanded vermiculite is obtained by heat treating of vermiculite ore concentrates in open flame furnaces. Expanded vermiculite, due to its layered-porous structure and high reflectivity, is the base for obtaining many thermo-insulating and refractory materials and products. Vermiculite is a part of building materials, and it is used to protect against radiation. Heat treating of vermiculite ores in flaming furnaces is an energy-intensive process; therefore the designs of electric modular-trigger furnaces are being actively developed. These furnaces have not significantly reduced the specific energy intensity of the firing process, that is why the work on creation of electric furnaces is up-to-date. This research is aimed to develop and construct a furnace prototype of a fundamentally new design.

The aim of the research is the experimental determination of operational specifications of a furnace model with a vibrating bottom platform which is a separate single-phase firing module during testing.

Methods: analysis of information sources in the field of research, synthesis of constructive solutions, physical modeling, parametric and functional description, experimental studies.

Results. The authors have developed the alternative electric furnace for firing vermiculite concentrates with a fundamentally new design structure which is a furnace with a vibrating bottom platform. A full-scale physical model of the furnace unit – a single-phase and single-module unit, was developed. Using the above-mentioned physical model the authors carried out the experiments and obtained the empirical data. During the experimental studies, the density of the expanded vermiculite was 90..91 kg/m³ and the productivity was 3,56 m³/h. The value of volume energy for various types of vermiculite roasting is 63,7..81,6 MJ/m³, which is almost three times less than that of existing open flame furnaces operating on hydrocarbon fuel.

Key words:

Furnace with a vibrating bottom platform, furnace prototype, electric modular-trigger furnace, vermiculite, vermiculite concentrate, thermal energy, volume energy value.

REFERENCES

1. Nizhegorodov A.I., Zvezdin A.V., Bryanskikh T.B. Analytical model of absorption-reflection properties of vermiculite under thermal. *Refractories and industrial ceramics*, 2017, vol. 57, no. 1, pp. 19–24. DOI: 10.1007/s11148-017-0047-6.
2. Ahtyamov R.Ya. Vermikulit – syre dlya proizvodstva ognepornyykh teploizolyatsionnykh materialov [Vermiculite is the raw material for production of refractory insulation materials]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2009, no. 1–2, pp. 59–64.
3. Mucahit Sutcu. Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, pp. 2819–2827.
4. Zhi-Dan Wen, Da-Wen Gao, Zhe Li, Nan-Qi Ren. Effects of humic acid on phthalate adsorption to vermiculite. *Chemical Engineering Journal*, 2013, vol. 223, pp. 298–303.
5. Zhang Y.N., Wang R.Z., Zhao Y.J., Li T.X., Riffat S.B., Wajid N.M. Development and thermochemical characterizations of vermiculite/SrBr₂ composite sorbents for low-temperature heat storage. *Energy*, 2016, vol. 115, pp. 120–128.
6. Jun Kariya, Junichi Ryu, Yukitaka Kato. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 94, pp. 186–192.
7. Balima F., An-Ngoc Nguyen, Reinert L., Le Floch S., Pischeda V., Duclaux L., San-Miguel A. Effect of the temperature on the structural and textural properties of a compressed K-vermiculite. *Chemical Engineering Science*, 2015, vol. 134, pp. 555–562.
8. *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and used*. Ed. by J.E. Kogal. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2006. 1529 p.
9. Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – a short guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 125, pp. 53–62.
10. Nizhegorodov A.I. Production of Foamed Vermiculite from Conglomerates in Modular-Pouring Electric Furnaces. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2016, vol. 57, no. 1, pp. 13–17. DOI: 10.1007/s11148-016-9918-5.
11. Sevim İşçi. Intercalation of vermiculite in presence of surfactants. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 146, pp. 7–13.
12. 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.
13. Nizhegorodov A.I. Electrical roasting system with vibrational batch supply. *Russian engineering research*, 2016, vol. 37, no. 3, pp. 180–184. DOI: 10.3103/S1068798X17030170.
14. Bryanskikh T.B. Three-module electric furnace for burning vermiculite and other bulk materials at vibratory feeding of raw materials. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 5, pp. 10–18. In Rus.
15. Bauman V.A., Bykhovskiy I.I. *Vibratsionnye mashiny i protsessy v stroitelstve* [Vibration apparatus and processes in construction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977. 255 p.
16. Weaver W. Jr., Timoshenko S.P., Young D.H. *Vibration Problems in Engineering*. New York, Wiley-Interscience, 1990. 624 p.
17. Incropera F.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York, John Wiley & Sons Edition, 2007. 999 p.
18. Marcos C., Menendez R., Rodriguez I. Thermoexfoliated and hydrophobized vermiculites for oleic acid removal. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 150, pp. 147–152.
19. Kremenetskaya I.P., Belyaevskiy 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.
20. Osman M.A. Organo-vermiculites: Synthesis, structure and properties. Platelike nanoparticles with high aspect ratio. *Journal of Materials Chemistry*, 2006, vol. 16, no. 29, pp. 300–3013. DOI: 10.1039/b606036f.
21. *Primorsky vermiculite* [Primorye vermiculite]. Available at: http://www.primver.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=4&lang=ru (accessed 11 January 2018).
22. Hombostel C. *Construction Materials: Types, Uses, and Applications*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1991. 1040 p.
23. Podolyak F.S. Sravnitel'naya effektivnost pechey dlya obzhiga vermiculita [Comparative efficiency of furnaces for burning vermiculite]. *Stroitelnye materialy*, 1973, no. 7, pp. 9–11.
24. Nizhegorodov A.I., Zvezdin A.V. *Energotekhnologicheskie agregaty dlya pererabotki vermiculitovykh koncentratov* [Energy-technology units for processing vermiculite concentrates]. Irkutsk, IGTU Press, 2015. 250 p.
25. Schackow A., Effting C., Folgueras V.M., Güths S., Mendes A.G. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 57, pp. 190–197.

Received: 30 January 2018.

Information about the authors

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

Tatiana B. Bryanskikh, postgraduate student, 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.

Alexander V. Gradoboev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Galina V. Vavilova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Josef Tlustý, PhD, professor, Czech Technical University.

Valeriya Tuzikova, postgraduate student, Czech Technical University; technical commercial representative Siemens, Energy Management.