

УДК 66.041.3-65; 691.278

Динамика процесса гравитационного разделения вспученных вермикулито-песочных конгломератов

В.Г. Зедгенизов^а, А.И. Нижегородов^б, И.А. Ядров^с

Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

^аVigez@istu.edu, ^бnastromo_irkutsk@mail.ru, ^сYdr08@mail.ru

Статья поступила 23.12.2012, принята 07.05.2013

В статье проводится исследование динамики разделения вермикулито-песочных конгломератов после обжига в электрической печи с целью выделения вспученного вермикулита при переработке отходов обогащения вермикулитовых руд. Частицы вермикулита, в основном, плоские, а частицы песка имеют кубоподобную форму, поэтому их разделение производится за счет различия коэффициентов формы и аэродинамического сопротивления. Для этого в основу исследования положена аналитическая модель процесса гравитационного разделения. Построены графики изменения скоростей песка и вермикулита, в зависимости от высоты падения. Представлена схема формирования вермикулито-песочного ядра и зон чистого вермикулита. Показаны взаимодействие частиц песка и вермикулита при соударении и траектория выброса вермикулита. Предложено устройство для выделения вспученного вермикулита из вермикулито-песочного ядра, образующегося при гравитационном разделении.

Ключевые слова: динамика гравитационного разделения, вермикулитовый конгломерат, гравитационное разделение компонентов, вермикулито-песочное ядро.

Dynamics of gravitational separation of expanded vermiculite-sand conglomerates

V.G. Zedgenizov^а, A.I. Nizhegorodov^б, I.A. Yadrov^с

National Research Irkutsk State Technical University, 83 Lermontov st., Irkutsk, Russia

^аVigez@istu.edu, ^бnastromo_irkutsk@mail.ru, ^сYdr08@mail.ru

Received 23.12.2012, accepted 07.05.2013

This paper studies the dynamics of vermiculite-sand conglomerates separation after firing in an electric furnace in order to obtain expanded vermiculite while processing vermiculite ore tailings. Vermiculite particles are generally flat and the particles of sand have a cube-like shape, therefore their separation is done due to the difference of shape and aerodynamic resistance coefficients. For this purpose, the analytical model of the gravitational separation process has been underlain the investigation. The diagrams of speeds change of sand and vermiculite depending on the falling height have been constructed. The scheme of formation of the vermiculite-sand kernel and the pure vermiculite zones have been presented. Interaction of sand and vermiculite particles at collision and a trajectory of vermiculite emission have been demonstrated. A device for separation of the expanded vermiculite out of the vermiculite-sand kernel, which is formed in the process of gravitational separation, has been proposed.

Keywords: gravitational separation dynamics, vermiculite conglomerate, components gravitational separation, vermiculite-sand kernel.

Введение. Вспученный вермикулит имеет многофункциональное назначение: это эффективный тепло-звукоизоляционный материал, пористый наполнитель для легких бетонов и растворов. Из него готовят сухие строительные смеси, производят огнезащитные плиты и краски, он применяется для изоляции тепловых агрегатов, для звукоизоляции помещений, при разливе стали и т. п. [5, 6, 7].

Исходным продуктом для производства вспученного вермикулита являются концентраты, получаемые обогащением вермикулитовых руд. Основным производителем концентратов является ОАО «Ковдорслюда» [6], хотя добыча и переработка вермикулита в России уже ведется и на других месторождениях.

Анализ Ковдорского сырья показывает, что в типовых концентратах весовое содержание песка от партии к партии может колебаться от 2...3 до 4...6 %.

Элементы теории разделения вспученных вермикулито-песочных конгломератов. При обогащении образуется много отходного материала. Частицы вермикулита в основном плоские, а частицы песка имеют кубоподобную форму, поэтому их разделение производится за счет различия коэффициентов формы и аэродинамического сопротивления [5, 7]. Однако в потоке обогащаемой руды присутствуют и «толстые» частицы. При равной с песком истинной плотности (2600...2800 кг/м³) такие частицы не выделяются из общего массива и уходят в отвал вместе с песком. Эти

отходные продукты содержат 27...52 % вермикулита [6, 7], поэтому их переработка является актуальной ресурсосберегающей задачей [2, 4].

При весовом содержании инертного материала (песка) до 4 % сырьевой ресурс относится к группе вермикулитовых концентратов; более 4 % – к группе вермикулитовых конгломератов. Такое разделение исходного сырья имеет принципиальное значение, так как от массовой доли и вида инертных компонентов зависит выбор технологии переработки и соответствующего оборудования [5].

Методы и результаты исследований. Процесс гравитационного разделения вермикулито-песочного конгломерата осуществляется после его обжига в электрической модульно-спусковой печи (рис. 1). Печь содержит барабанный питатель сырья 1, подающий его в пространство обжига 4, образованное основанием и термокрышкой 7 модуля. За счет нагревателей 5, закрепленных на изоляторах 6, вермикулитовый компонент вспучивается и вместе с песком, пересыпаясь с верхних модулей на нижние, выходит из печи.

Компоненты разделяются при их сбрасывании в бункер 9 через патрубок 8 за счет различия масс и коэффициентов их аэродинамического сопротивления.

Пусть аэродинамическое сопротивление падению частиц R пропорционально квадрату скорости:

$$R = \beta \cdot \dot{x}^2, \quad (1)$$

где \dot{x} – скорость частицы, м/с; β – коэффициент аэродинамического сопротивления, кг/м, определяемый по формуле [2]:

$$\beta = k_\phi \cdot \gamma_e \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4}, \quad (2)$$

где: k_ϕ – коэффициент формы частиц; γ_e – плотность воздуха (в нормальных условиях $\gamma_e \sim 1,2$ кг/м³ [1]); D – условный диаметр вспученного зерна, м.

Коэффициент формы зерен вермикулита $\sim 0,55$, частиц песка $\sim 0,78$ [1].

Баланс сил, действующих на падающие частицы потока, описывается дифференциальным уравнением:

$$m\ddot{x} = mg - \beta\dot{x}^2, \quad (3)$$

где m – масса частицы, кг.

Уравнение (3) имеет точное решение, позволяющее установить зависимость скорости частицы от высоты падения h [3]:

$$V = V_{np} \sqrt{1 - e^{-\frac{2gh}{V_{np}^2}}}, \quad (4)$$

где h – высота падения, м; V_{np} – асимптотический предел скорости падения, м/с, определяемый по формуле:

$$V_{np} = \sqrt{\frac{4mg}{\pi k_\phi \gamma_e D^2}}. \quad (5)$$

Для вспученных зерен конгломератов второй размерной группы ($D = 2$ мм), при насыпном объемном

весе 100 кг/м³ и коэффициенте пористости $k_\phi \sim 0,365$ [5] истинная плотность составляет $\sim 157,5$ кг/м³, а масса зерна $m_B = 0,66 \cdot 10^{-6}$ кг. Масса песчинок с условным диаметром 2 мм равна $m_D = 10,89 \cdot 10^{-6}$ кг.

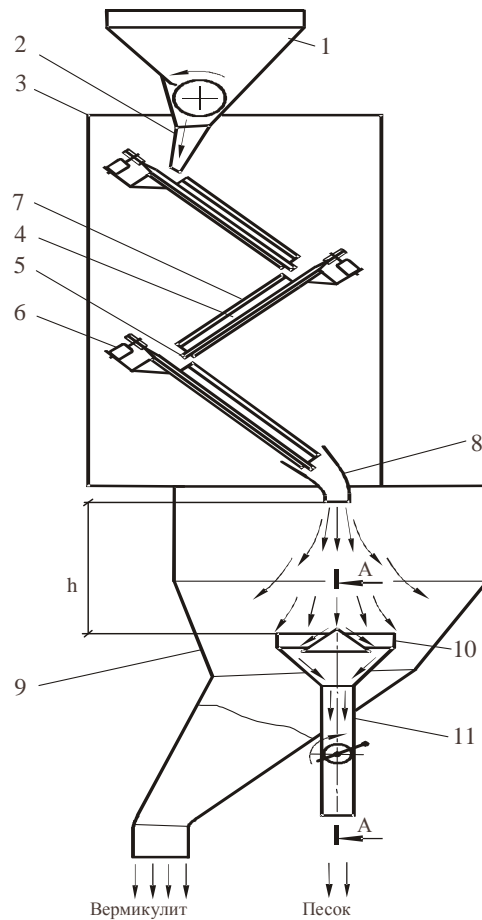


Рис. 1. Электрическая модульно-спусковая печь с агрегатом гравитационно-аэродинамического разделения

Тогда соответствующие предельные скорости равны: $V_{np}^e = 1,77$ и $V_{np}^n = 6,03$ (м/с).

По формуле (4) построены графики изменения скоростей песка и вермикулита, в зависимости от высоты падения (рис. 2).

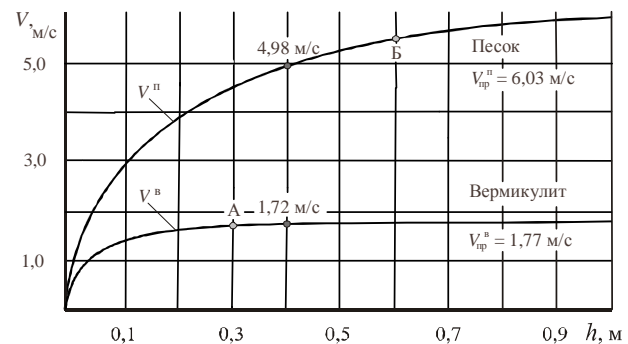


Рис. 2. Зависимости скорости частиц песка и вермикулита от высоты падения

В точке А при высоте 0,3 м скорость вермикулита стабилизируется (1,72 м/с). Но для эффективного раз-

деления компонентов разность скоростей V_{np}^n и V_{np}^e должна быть максимальной. Высота сбрасывания 0,6 м – точка Б – в большей мере отвечает данному требованию, обеспечивая компактность разделительного оборудования.

Частицы песка обладают значительно бóльшим количеством движения. В результате соударения траектории вермикулитовых зерен будут отклоняться от вертикали, а сами зерна – устремляться к периферийным участкам бункера. На рис. 3 показана схема взаимодействия частиц при соударении (положение 1).

При косом ударе вермикулитовое зерно, движущееся со скоростью V_1^e , получает дополнительную скорость, отклоняющую его от вертикали. Модуль скорости после удара V_2^e возрастает, а вектор отклоняется на угол α^e . Изменение траектории частицы песка, как видно из векторной суммы, намного меньше.

В момент удара образуется система из двух материальных точек с общим центром масс, скорость которого равна [3]:

$$V_c = \frac{m_n V_1^n + m_e V_1^e}{m_n + m_e} \quad (6)$$

Скорости частиц вермикулита и песка после соударения будут равны:

$$V_2^e = V_c + k_e (V_c - V_1^e), \quad (7)$$

$$V_2^n = V_c + k_e (V_c - V_1^n), \quad (8)$$

где k_e – коэффициент восстановления при ударе.

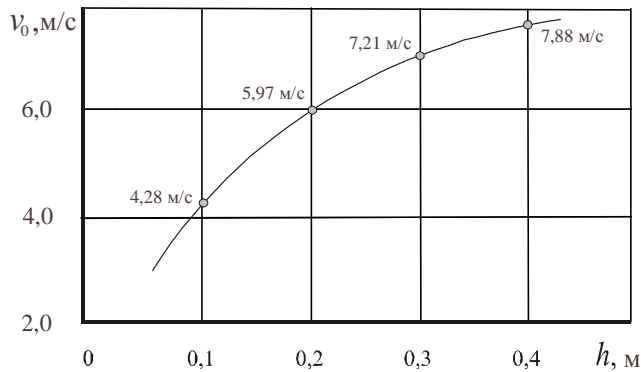


Рис. 3. Взаимодействие частиц песка и вермикулита при соударении

Не учитывая потери энергии удара на деформацию (поломку) частиц и полагая $k_e = 1$, определим по формулам (6...8) скорости центра масс V_c и самих частиц после соударения при $h = 0,4$ м: $V_c = 4,8$ м/с, $V_2^e = 7,88$ м/с, $V_2^n = 4,62$ м/с.

В результате обмена количеством движения уменьшение скорости песка составляет 7,2 % (при $V_1^n = 4,98$ м/с), а увеличение скорости вермикулита – 458 % (при $V_1^e = 1,72$ м/с). Очевидно, что такое увеличение скорости приведет к значительному отклонению траектории

после удара. Скорость вермикулитового зерна после удара в системе координат ХУ становится начальной – $v_0 = V_2^e = 7,88$ м/с; ее значение зависит от высоты, на которой произошло соударение.

На рис. 4 показано изменение модуля начальной скорости, в зависимости от высоты соударения: при увеличении h скорость выброса частицы из потока вермикулито-песочной смеси возрастает, но при h более 0,4 м рост скорости замедляется. К начальным условиям относится и значение угла α^e .

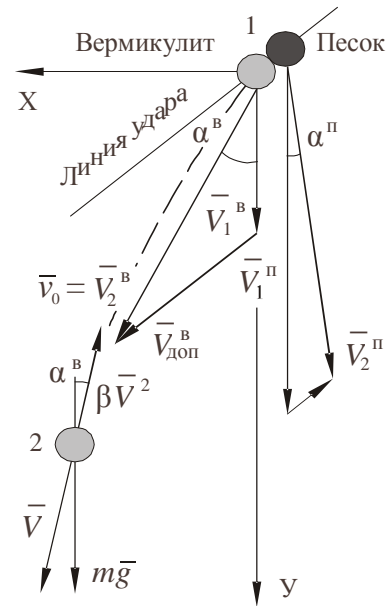


Рис. 4. График зависимости начальной скорости частицы вермикулита после соударения

Рассмотрим силы, действующие на вспученное вермикулитовое зерно, получившее начальную скорость v_0 в системе координат ХУ после удара в положении 2, рис. 3. Движение частицы будет описываться системой уравнений:

$$\ddot{x} = -\frac{\beta}{m} V^2 \sin \alpha^e, \quad \ddot{y} = g - \frac{\beta}{m} V^2 \cos \alpha^e. \quad (9)$$

Выражая $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$ через отношения: $\sin \alpha = \frac{\dot{x}}{V}$

и $\cos \alpha = \frac{\dot{y}}{V}$, а модуль скорости как:

$V = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$, после соответствующих подстановок получаем:

$$\ddot{x} = -\frac{\beta}{m} \dot{x} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}, \quad \ddot{y} = g - \frac{\beta}{m} \dot{y} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}. \quad (10)$$

Решение системы (10) проводилось в программе Matlab. В таблице 1 приведены результаты расчета координат x, y и скоростей V_x, V_y вспученного вермикулитового зерна с $D = 2$ мм при уровне соударения $h = 0,4$ м и начальных условиях $\alpha^e = 45^\circ$, $v_{0y} = 5,9$, $v_{0x} = 5,04$ (м/с).

Расчетные данные

t, c	0	0,05	0,1	0,5	0,8
$v_y, m/c$	5,9	2,82	2,14	1,77	1,78
$v_x, m/c$	5,04	2,47	1,53	0,14	0,027
x, m	0	0,19	0,31	1,03	1,57
y, m	0	0,18	0,28	0,5	0,52

На рис. 5 показаны траектории, построенные по результатам расчета координат после соударения на разных уровнях h . Для каждого значения h (0,1...0,4 м) система координат совмещалась с точкой соударения.

Зададим коридор падения песка шириной 0,05 м (направляющий патрубок, рис. 6). Зерна вермикулита после удара под углом 45° на высоте 0,6 м выбрасываются за пределы коридора на расстояние, в шесть раз превышающее его ширину (рис. 5). Чем ниже столкновение, тем дальше выброс, так как количество движения у песка с увеличением высоты возрастает больше, чем у вермикулита.

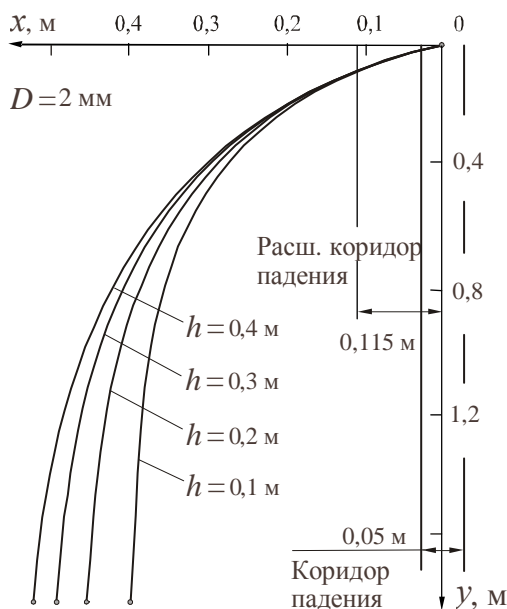


Рис. 5. Траектория выброса вермикулита при соударении

Так как модуль начальной скорости зерна (7) не зависит от угла соударения, то при увеличении угла выброса его дальность будет возрастать, а при уменьшении – снижаться. При малых углах вермикулит будет оставаться вблизи коридора падения, формируя с песком ядро в центре бункера (рис. 6). Все частицы, выброшенные за пределы коридора, будут концентрироваться в периферийных зонах.

Исследование модели процесса позволило установить, что уже при высоте сбрасывания 0,6 м дальность выброса частиц превышает ширину коридора более чем в шесть раз, чем обеспечивается эффективное разделение компонентов.

Уровень $h = 0,6$ м является минимально необходимым. Уменьшение h будет приводить к увеличению концентрации вермикулита в ядре (рис. 6), и наоборот.

Столкновение с вермикулитом не приводит к заметному изменению скорости частиц песка (7,2 %). Для оценки пределов выхода из коридора рассмотрим столкновение его частиц с min (1,85 мм) и max (2,15 мм) диаметрами.

По формулам (5) и (4) определяем предельные скорости мелкой и крупной частиц и их скорости при $h = 0,4$ м. Скорости центра масс и малой частицы после удара находим по формулам:

$$V_c = \frac{m_m V_1^m + m_k V_1^k}{m_m + m_k}, \quad V_2^m = V_c + k_e (V_c - V_1^m), \quad (11)$$

где m_m и V^m – масса и скорость мелкой частицы ($D = 1,85$ мм), m_k и V^k – масса и скорость крупной частицы ($D = 2,15$ мм). Скорость и отклонение мелкой частицы после удара составляют: $V_2^m = 5,04$ м/с, $\alpha^n = 2^\circ$.

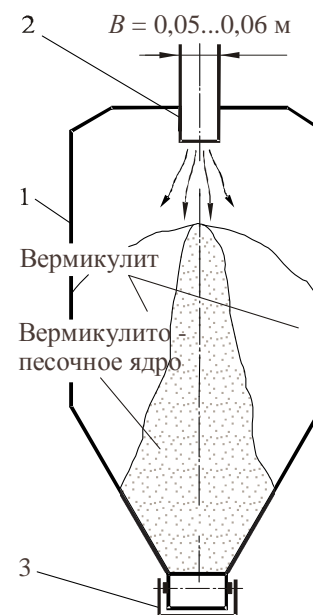


Рис. 6. Схема формирования вермикулито-песочного ядра и зон чистого вермикулита: 1 – бункер, 2 – патрубок, 3 – затвор

При $v_{0y} = 5,03$ и $v_{0x} = 1,86$ (м/с) определяем значения координаты x и проекции скорости v_x выбрасываемых мелких частиц песка через 0,6 с. после столкновения: $x = 0,09$ м, $v_x = 0,098$ м/с.

Если выброс мелких частиц происходит на границе исходного коридора падения, то максимальное расширение коридора составит 0,23 м. Этим значением опре-

деляется ширина конического раструба 10 разделительной камеры 11 (рис. 1).

Анализ динамики процесса гравитационного разделения вспученного вермикулита раскрывает его физическую картину: из-за большей скорости и массы песок при многочисленных соударениях выбивает вермикулит за пределы коридора падения, в периферийную часть бункера. Но некоторая часть вермикулита формирует в центре бункера вермикулито-песочное ядро.

Для разделения компонентов ядра предложено устройство в виде крестообразной аэродинамической камеры (рис. 7).

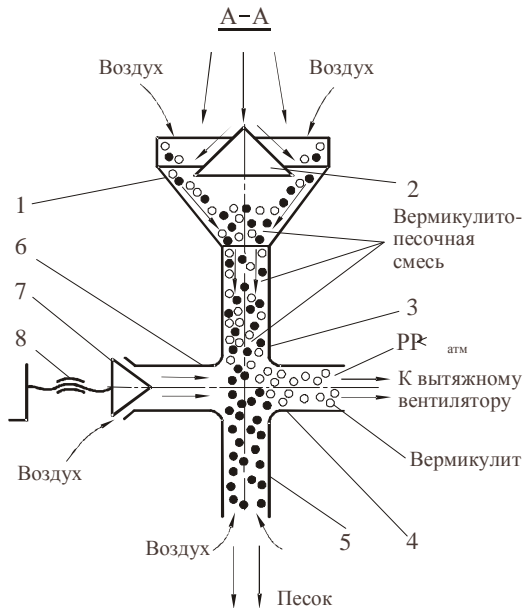


Рис. 7. Камера аэродинамического разделения вермикулито-песочной смеси

Вермикулито-песочная смесь поступает из печи обжига в раструб 1, где, ударяясь о конус 2, теряет скорость и по кольцевому зазору в раструбе переходит в вертикальный участок 3. В горизонтальном участке 4 с помощью вытяжного вентилятора (не показан) создается поток воздуха, который подхватывает легкие зерна вспученного вермикулита и уносит их в осадительный бункер. Тяжелые частицы песка, несмотря на встречный поток воздуха на участке 5, выпадают из разделительной камеры. С помощью конусного затвора 7 и винтовой передачи 8 регулируется подсос воздуха на участке 6, и тем самым, соотношение расхода воздуха на участках 3, 4 и 5.

Эффективное разделение достигается тем, что на участке 4 обеспечивается скорость воздуха больше скорости витания вермикулита, а на участке 5 – меньше скорости витания частиц песка.

Выводы

Анализ динамики процесса гравитационного разделения вспученного вермикулита раскрывает его физическую картину: из-за большей скорости и массы песок при многочисленных соударениях выбивает вермикулит за пределы коридора падения, в периферийную часть бункера. Но некоторая часть вермикулита формирует в центре бункера вермикулито-песочное ядро.

Исследование процесса разделения компонентов в аэродинамической камере, показанной на рис. 7, – это второй этап исследований динамики и синтеза элементов конструкции системы разделения вермикулито-песочных конгломератов.

Литература

1. Вайнсон А.А. Подъемно - транспортные машины. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1974. 431 с.
2. Зубков А.А., Мелентьев Г.Б., Шуленина З.М. Технология обогащения и перспективы использования отходов вермикулитового производства // Рациональное природопользование: ресурсо-энергосберегающие технологии и их метрологическое обеспечение: материалы науч.-практ. конф. М., 2005. С. 34–38.
3. Лойцьянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики: в 2 т. Т. 2: Динамика. М.: Наука, 1983. 640 с.
4. Нижегородов А.И. Адаптированный технологический комплекс для подготовки и обжига вермикулитовых концентратов с высоким содержанием инертного материала // Строительные и дорожные машины. 2009. № 12. С. 28–31.
5. Нижегородов А.И. Технологии и оборудование для переработки вермикулита: оптимальное фракционирование, электрический обжиг, дообогащение. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. 172 с.
6. Продукция. ЗАО «Ковдорслуда» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kovsluda.ru/produktion.html> (дата обращения: 12. 02. 2006).
7. Хвостенков С.И., Журбенко Г.В. Исследование структуры и физико-химических свойств и поиски новых областей применения вермикулита: разработка технологии новых строительных материалов // Отчет о НИР. Кольский научный центр. Мурманск, 1972. С. 122–149.

References

1. Vaynson A.A. Carrying and lifting machines. M.: Mashinostroeniye, 1974. 431 s.
2. Zubkov A.A., G.B. Melent'yev, Shulenina Z.M. Beneficiation technology and prospects for utilizing wastes of vermiculite production // Rational'noye prirodopol'zovaniye: resurso- i energosberegayushchiye tekhnologii i ikh metrologicheskoye obespecheniye 2005. S. 34-38.
3. Loitsyansky L.G., Lur'ye A.I. The course on Theoretical Mechanics: in 2 volumes. M.: Nauka, 1983. Volume 2: Dynamics. 640 s.
4. Nizhegorodov A.I. The adapted technological system for preparation and firing of vermiculite concentrate with high inert material content // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2009. № 12. S. 28 - 31.
5. Nizhegorodov A.I. Technology and equipment for vermiculite processing: optimal fractionation, electric firing, beneficiation. Irkutsk: Izd-vo IRGTU, 2011. 172 s.
6. Products. CJSC "Kovdorslyuda" [electronic resource]. <http://www.kovsluda.ru/produktion.html> (12. 02. 2006).
7. Khvostenkov S.I., Zhurbenko G.V. Investigation of the vermiculite structure and physico-chemical properties and the search for its new applications: development of new building materials technology // Otchet o NIR. Kol'sky nauchny tsentr. Murmansk 1972. S. 122-149.