ИССЛЕДОВАНИЕ СЕГРЕГАЦИИ ЧАСТИЦ В ВИБРООЖИЖЕННОМ СЛОЕ ПРИ ГРОХОЧЕНИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕЛКИХ ФРАКЦИЙ В ИСХОДНОМ СЫРЬЕ

М.А. Гриценко, А.П. Алешина, Е.Р. Брик, В.А. Огурцов

Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ), 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, д. 20

Аннотация. Работы по ячейному моделированию грохочения с помощью цепей Маркова базируются на гипотезе о линейности процесса, согласно которой скорость сегрегации мелкой фракции к поверхности сита считается постоянной и не зависящей от фракционного состава окружающего ее материала. Это приводит к физическому противоречию, когда в примыкающих к ситам ячейках оказывается больше материала, чем они могут вместить. Особенно это касается сыпучих материалов с высоким содержанием мелких фракций в исходном сырье. В настоящей работе исследуется нелинейная модель сегрегации мелких частиц в виброожиженном слое сыпучего материала, свободная от этого противоречия. На основании экспериментальных и расчетных результатов сделан вывод, что модель с постоянной скоростью сегрегации не может адекватно описать процесс грохочения смеси частиц с высоким содержанием мелочи. Нелинейная модель обеспечивает более точное описание этого процесса. Последнее позволяет положить эту модель в основу инженерного метода расчета процесса промышленного грохочения, учитывающего высокое содержание частиц мелких фракций в исходном сырье.

Ключевые слова: вибрационный грохот, цепь Маркова, матрица переходных вероятностей, вектор состояния, высота слоя, сегрегация

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.70-76

STUDY OF PARTICLE SEGREGATION IN FLUIDIZED BED IN THE PROCESS OF SCREENING OF GRANULAR MATERIALS WITH HIGH CONTENT OF FINE FRACTIONS IN FEEDSTOCK

M.A. Gritsenko, A.P. Aleshina, E.R. Brik, V.A. Ogurtzov

Ivanovo State Polytechnical University, 20 8th of March st., Ivanovo, 153037, Russian Federation

Abstract. Works on cell-like modeling of screening using Markov chains are based on hypothesis of linearity of the process according to which the fine fractions segregation rate to the sieve surface is considered to be constant and not dependent on the fractional composition of material surrounding it. This leads to a physical contradiction when there is more material in the cells adjacent to the sieve than they can accommodate. This is especially true for granular materials with a high content of fine fractions in feedstock. A nonlinear model of segregation of fine particles in fluidized bed of granular material free from the abovementioned contradiction is studied in this paper. Experimental and calculation data of evolution of the fine fraction content distribution as per the bed depth, as well as the degree of extraction thereof into the undersieve space are illustrated. Based on the experimental and calculated results it is concluded that a model with constant segregation rate can not adequately describe the process of screening a mixture of particles with high content of fines. The nonlinear model provides a more accurate description of this process. The latter makes it possible to use this model as a basis for engineering calculation method of industrial screening process and takes into account the high content of fine particles in the feedstock.

Key words: vibration screen, Markov chain, matrix transition probabilities, state vector, bed depth, segregation

Предприятия Ивановской области, ведущие разработку минерально-сырьевых месторождений, сталкиваются с проблемой фракционирования гравийно-песчаных смесей с низким содержанием каменного материала и высоким содержанием мелких частиц. Так, содержание песка фракции 0...5 мм в добываемом сырье может достигать 90 %. Это обстоятельство приводит к тому, что приходится учи-

тывать низкое качество исходного сырья при выборе сортировочных агрегатов, работающих в карьерах, и рассчитывать их технологические режимы.

В связи с этим представляется актуальным определение эффективных режимов фракционирования аппаратов, рассчитанных с помощью математических моделей, учитывающих высокое содержание частиц мелких фракций в исходном сырье.

Теорией грохочения занимались отечественные и зарубежные исследователи: И.М. Абрамович, В.А. Олевский, И.И. Блехман, Л.А. Вайсберг, О.Н. Тихонов, В.А. Перов, П.С. Ермолаев, И.В. Пономарев, И.Ф. Гончаревич, Е.А. Непомнящий, А. Майнел, Х. Шуберт и мн. др. [1, 2]. Сегрегационные процессы частиц в виброожиженном слое рассматриваются, например, в [3–6]. Дальнейшим развитием моделирования процесса грохочения явилось применение теории цепей Маркова [7–11]. Большинство работ по ячеечному моделированию, использующих эту теорию, базируются на гипотезе о линейности процесса, когда скорость сегрегации мелкой фракции к поверхности сита считается постоянной и не зависящей от фракционного состава окружающего ее материала [12–18]. Возникает физическое противоречие: при грохочении сыпучих материалов с высоким содержанием мелких фракций в исходном сырье в примыкающих к сити ячейках оказывается больше материала, чем они могут вместить. Предлагается нелинейная модель грохочения, разрешающая это противоречие.

Расчетная схема процесса показана на рис. 1, а. Сыпучий материал расположен слоем высотой h на вибрирующем сите. Частицы мелких фракций мигрируют через виброожиженный слой сыпучего материала вниз к поверхности сита и, достигнув ее, выводятся в подрешетный продукт.

На рис. 1, б показана ячейечная модель процесса, в которой высота слоя разбита на m ячеек идеально-го перемешивания высотой $\Delta x = h/m$. Процесс рассматривается в дискретные моменты времени $t_k = (k-1)\Delta t$, где Δt — продолжительность, а k — номер временного перехода. В течение времени перехода частицы могут перейти в соседние ячейки, т.е. вверх или вниз и остаться в ячейке.

Направления возможных переходов показаны на рис. 1, б стрелками. Из нижней ячейки частицы мелкой фракции могут уйти в подрешетный продукт и покинуть процесс. Очевидно, что благодаря

сегрегации доля частиц мелкой фракции, перемещающихся в течение временного перехода вниз, будет больше, чем доля частиц, перемещающихся вверх. Из этих долей можно выделить симметричную (диффузионную) составляющую d и несимметричную составляющую v , обусловленную сегрегацией (рис. 1, в). Эти составляющие связаны с натуральными характеристиками процесса, который моделируется уравнением конвективной диффузии, соотношениями $d = D\Delta t/\Delta x^2$ и $v = V\Delta t/\Delta x$, где D — коэффициент макродиффузии, V — размерная скорость сегрегации, учитывающие физико-механические характеристики сыпучего материала и параметры вибровоздействия на него сита грохота [8, 12, 13].

В каждый момент времени распределение мелкой фракции по ячейкам характеризуется вектором-столбцом S^k . Эволюция этого вектора с течением времени описывается рекуррентным матричным равенством

$$S^{k+1} = PS^k, \quad (1)$$

где P — матрица переходных вероятностей, принимающая вид:

$$P = \begin{bmatrix} 1-d-v_1^k & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ d+v_1^k & 1-2d-v_2^k & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & d+v_2^k & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1-2d-v_{m-1}^k & d \\ 0 & 0 & \dots & 0 & d+v_{m-1}^k & 1-d \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Особенностью этой матрицы является то, что скорость сегрегации не считается постоянной, а меняется от ячейки к ячейке и от перехода к переходу.

Скорость сегрегации в зависимости от содержания мелкой фракции в ячейку линейно зависит от содержания мелкой фракции в этой ячейке, т.е.

$$v_i^k = v_0(1-S_{i+1}^k), \quad (3)$$

где v_0 — максимальная начальная скорость сегрегации.

Рис. 1. Расчетная схема процесса (а), его ячейечная модель (б) и доли переноса фракции из ячейки (в)

Выход мелкой фракции в подрешетный продукт опишем следующим образом. Пусть на каждом временном переходе после воздействия на вектор состояния S^k матрицей P из нижней ячейки цепи выводится доля v_f содержащейся в ней мелкой фракции, т.е. ее выход составляет

$$q^{k+1} = S_m^{k+1} v_f^k, \quad (4)$$

а оставшаяся в ней доля мелкой фракции равна

$$S_m^{k+1} := S_m^{k+1} (1 - v_f^k), \quad (5)$$

где $:=$ — оператор присваивания.

Доля частиц мелкой фракции v_f выводимая из нижней ячейки, зависит от соотношения размеров ячейки сита и частицы, проникающей в подситовое пространство, а также параметров колебаний грохота [13, 19–21]. Описание механизма проникновения частиц через отверстия сита и метод определения величины v_f приведены в [13].

Полный выход мелкой фракции за $(k + 1)$ переход или кинетика процесса грохочения рассчитывается по формуле

$$\varepsilon^{k+1} = \sum_0^{k+1} q^{k+1}. \quad (6)$$

Принципиальное значение имеет характер движения частиц внутри слоя. Естественно, что меняющаяся скорость сегрегации отразится на эволюции распределения мелких частиц по слою сыпучего материала [8, 12, 13]. Для исследования степени влияния нелинейности модели была создана лабораторная установка (рис. 2), реализующая процесс миграции двухкомпонентной смеси частиц по виброоживленному слою.

Рабочим органом установки является плоский экран из прозрачных пластин. Внутри экрана помещались металлические шайбы размерами 5 и 11 мм, которые могли перемещаться друг относительно друга в пространстве между пластинами. Экран совершал круговые колебания под действием кинема-

тического вибропривода, представляющий собой эксцентриковый вал, соединенный с электродвигателем. Мелкие частицы перемещались в среде крупных, перемешиваясь с ними, и проникали в подситовое пространство. Размер отверстия сита составлял 8 мм. Экран являлся разъемным, что давало возможность создать любое начальное распределение мелких частиц в среде крупных.

На рис. 2, б приведена фотография начального распределения частиц по слою, когда мелкие частицы располагались над крупными.

На рис. 3 представлены фотографии одного из серии опытов грохочения двухкомпонентной смеси, где показано распределения мелких частиц по слою и их переход в подситовое пространство в различные моменты времени.

На рис. 4 приведены расчетные и опытные данные эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя и их содержание в подситовом пространстве.

Пространство над ситом было разделено на четыре ячейки одинаковой высоты. Производился подсчет количества частиц в ячейках слоя и в подситовом пространстве в фиксированные моменты времени, как в данном, так и в других опытах, проводимых при одинаковых условиях: частота колебаний экрана — 15 Гц, амплитуда — 10 мм.

При компьютерной обработке материалов съемки были выделены контрольные моменты времени фиксации процесса — 10, 20, 30, 40 с. Число временных переходов — 300 ($\Delta t = 0,2$ с). Расчетные величины определены с помощью безразмерных стохастических параметров модели, которые получены идентификацией экспериментальных и расчетных кинетик грохочения. Коэффициент диффузии для рассматриваемой серии опытов составил $d = 0,005$, начальная скорость сегрегации $v_0 = 0,026$, скорость проникновения частиц через отверстия сита $v_f = 0,21$.

Рис. 2. Схема установки (а) и вид экрана (б) с двухкомпонентной смесью частиц для периодического грохочения: 1 — прозрачный экран; 2 — сменное сито; 3 — эксцентриковый вал; 4 — электродвигатель с регулируемым числом оборотов; 5 — винты для изменения амплитуды колебаний рабочего органа

Рис. 3. Результаты фотосъемки процесса грохочения двухкомпонентной смеси частиц в различные моменты времени

Рис. 4. Опытные и расчетные данные эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя и степень их извлечения в подситовое пространство

Из рис. 4 видно, что расчетные и опытные распределения мелких частиц в ячейках слоя, особенно при их малой концентрации в одной ячейке в некоторые моменты времени существенно отличаются, но среднее отклонение по всем опытам составляет менее 10 %, что свидетельствует об адекватности модели, так как сравниваются локальные характеристики процесса. Расхождение интегральных характеристик процесса, которыми являются средние значения степеней извлечения мелких частиц из исходной смеси в серии опытов, не превышает 1,5 %.

Из рис. 4 видно, что расчетные и опытные распределения мелких частиц в ячейках слоя, особенно при их малой концентрации в одной ячейке в некоторые моменты времени существенно отличаются, но среднее отклонение по всем опытам составляет менее 10 %, что свидетельствует об адекватности модели, так как сравниваются локальные характеристики процесса. Расхождение интегральных характеристик процесса, которыми являются средние значения степеней извлечения мелких частиц из исходной смеси в серии опытов, не превышает 1,5 %.

На рис. 5 приведены результаты кинетики рассматриваемой серии опытов по грохочению двухкомпонентной смеси и результаты расчетов, проведенных по линейной и нелинейной моделям грохочения с найденными значениями безразмерных стохастических параметров.

Из рис. 5 (кривая 2) можно сделать вывод, что линейная модель дает завышенные результаты степени извлечения частиц мелких фракций.

Очевидно, что модель с постоянной скоростью сегрегации не может адекватно описать процесс грохочения смеси частиц с высоким содержанием мелочи. Нелинейная модель обеспечивает более точное описание этого процесса. Последнее позволяет положить эту модель в основу инженерного метода расчета процесса промышленного грохочения, учитывающую высокое содержание частиц мелких фракций в исходном сырье.

Рис. 5. Кинетика грохочения проходковых частиц: 1 — кривая извлечения, рассчитанная по нелинейной модели и опытным данным; 2 — кривая извлечения, рассчитанная по линейной модели

ЛИТЕРАТУРА

1. Вайсберг Л.А., Картавый А.Н., Коровников А.Н. Просеивающие поверхности грохотов : конструкции, материалы, опыт применения / под ред. Л.А. Вайсберга. СПб. : ВСЕГЕИ, 2005. 250 с.
2. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств: вибрационная механика и вибрационная техника. СПб. : Руда и металлы, 2013. 639 с.
3. Блехман И.И., Вайсберг Л.А. К теории вибрационной сегрегации // Обогащение руд. 2014. № 5 (353). С. 35–40.
4. Вайсберг Л.А., Иванов К.С., Мельников А.Е. Совершенствование подходов к математическому моделированию процесса вибрационного грохочения // Обогащение руд. 2013. № 2 (344). С. 22–26.
5. Арсентьев В.А., Блехман И.И., Блехман Л.И., Васильков В.Б., Феоктистов А.Ю., Якимов К.С. Классификация сыпучего материала в условиях вибрационной сегрегации — устройство, моделирование, эксперимент // Обогащение руд. 2010. № 5. С. 13–16.
6. Блехман И.И., Блехман Л.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б., Якимов К.С. О явлении вибрационной диффузионной сегрегации в сыпучих средах // Доклады Академии наук. 2016. Т. 466. № 1. С. 30–32.
7. Надутый В.П., Лапшин Е.С. Вероятностные процессы вибрационной классификации минерального сырья. Киев : Наукова думка, 2005. 178 с. (Проект «Наукова книга»)
8. Алоян Р.М., Федосов С.В., Мизонов В.Е. Теоретические основы математического моделирования механических и тепловых процессов в производстве строительных материалов. Иваново : ИГАСУ, 2011. 255 с.
9. Мизонов В.Е., Berthiaux H., Gatumel C., Шелатонова К.А. Оптимальное управление смешиванием сегрегирующих дисперсных материалов // Вестник Ивановского

государственного энергетического университета. 2014. № 2. С. 50–54.

10. Балагуров И.А., Мизонов В.Е., Митрофанов А.В. Математическая модель формирования многокомпонентной смеси сегрегирующих компонентов // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. № 8. С. 67–70.

11. Bridgwater J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means — A perspective // Particuology. August 2012. Vol. 10. Issue 4. Pp. 397–427.

12. Акулова М.В., Алешина А.П., Огурцов Ал.В., Огурцов Ан.В. Моделирование процесса классификации сыпучих материалов на виброгрохотах с многоярусной компоновкой сит // Вестник МГСУ. 2013. № 2. С. 80–87.

13. Мизонов В.Е., Огурцов В.А., Федосов С.В., Огурцов А.В. Процессы сепарации частиц в виброожиженном слое: моделирование, оптимизация, расчет. Иваново : ИГЭУ, 2010. 191 с.

14. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г., Барочкин Е.В. Аэродинамическая классификация порошков. 2-е изд., перераб. и доп. Иваново : ПресСт, 2014. 259 с.

15. Dehling H.G. A stochastic model for mixing and segregation in slugging fluidized beds // Powder Technology. 2007. Vol. 171. Issue 2. Pp. 118–125.

16. Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology // Powder Technology. 2005. Vol. 157. Issues 1–3. Pp. 128–137.

17. Mizonov V., Mitrofanov A., Ogurtsov A., Tannous K. Modeling of particle concentration distribution in a fluidized bed by means of the theory of Markov chains // Particulate Science and Technology: An International Journal. 2014. Vol. 32 (2). Pp. 171–178.

18. Mizonov V., Zaitsev V., Volynskii V., Leznov V. Modeling the moisture content distribution over a rotating porous cylinder using Markov chains // *Chemical Engineering & Technology*. 2011. Vol. 34. Pp. 1185–1190.

19. Пелевин А.Е. Вероятность прохождения частиц через сито и процесс сегрегации на вибрационном грохоте // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2011. № 1. С. 119–129.

20. Вайсберг Л.А., Иванов К.С. Универсальный метод описания формы частиц, ее влияние на результаты ситовой классификации // *Обогащение руд*. 2014. № 4 (352). С. 34–37.

21. Кульбицкий А.В. Влияние параметров колебаний плоских гирационных сортировок на процесс фракционирования щепы // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии* : сб. науч. тр. СПб. : СПбГЛТУ, 2007. Вып. 178 (12). С. 99–105.

Поступила в редакцию в ноябре 2016 г.

Об авторах: **Гриценко Михаил Алексеевич** — аспирант кафедры технологии строительного производства, **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ)**, 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, д. 20, 8 (4932) 38-01-45, assassin-sunn@mail.ru;

Алешина Анна Павловна — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительной механики, **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ)**, 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, д. 20, 8 (4932) 38-01-45, annaricci89@mail.ru;

Брик Екатерина Романовна — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства, **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ)**, 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, д. 20, 8 (4932) 38-01-45, e_gorohova@list.ru;

Огурцов Валерий Альбертович — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии строительного производства, **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ)**, 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, д. 20, 8 (4932) 38-01-45, ogurtzovvawork@mail.ru.

Для цитирования: *Гриценко М.А., Алешина А.П., Брик Е.Р., Огурцов В.А.* Исследование сегрегации частиц в виброожиженном слое при грохочении сыпучих материалов с высоким содержанием мелких фракций в исходном сырье // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. Вып. 1 (100). С. 70–76. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.70-76

REFERENCES

1. Kartavyi A.N., Korovnikov A.N. *Proseivayushchie poverkhnosti grokhotov : konsruktsii, materialy, opyt primeneniya* [Jigger Screen Surfaces : Design, Materials, Operating Experience]. Saint-Petersburg, VSEGEI Publ., 2005, 252 p. (In Russian)

2. Blekhan I.I. *Teoriya vibratsionnykh protsessov i ustroystv : vibratsionnaya mekhanika i vibratsionnaya tekhnika* [Theory of Vibrational Processes and Devices : Vibration Mechanics and Vibration Engineering]. Saint-Petersburg, Ruda i metally Publ., 2013, 639 p. (In Russian)

3. Blekhan I.I., Vaysberg L.A. K teorii vibratsionnoy segregatsii [To the Theory of Vibration Segregation]. *Obogashchenie rud* [Beneficiation of Ores]. 2014, no. 5, pp. 35–40. (In Russian)

4. Vaysberg L.A., Ivanov K.S., Mel'nikov A.E. Sovershenstvovanie podkhodov k matematicheskomu modelirovaniyu protsessa vibratsionnogo grokhocheniya [Improvement of Approaches to Mathematical Modeling of Vibration Screening Process]. *Obogashchenie rud* [Beneficiation of Ores]. 2013, no. 2 (344), pp. 22–26. (In Russian)

5. Arsent'ev V.A., Blekhan I.I., Blekhan L.I., Vasil'kov V.B., Feoktistov A.Yu., Yakimova K.S. Klassifikatsiya syuchego materiala v usloviyakh vibratsionnoy segregatsii — ustroystvo, modelirovanie, eksperiment [Classification of Granular Material under Conditions of Vibration Segregation — Design, Modeling, Experiment]. *Obogashchenie rud* [Beneficiation of Ores]. 2010, no. 5, pp. 13–16. (In Russian)

6. Blekhan I.I., Blekhan L.I., Vaisberg L.A., Vasil'kov V.B., Yakimova K.S. O yavlenii vibratsionnoy diffuzionnoy segregatsii v syuchikh sredakh [About the Vibration Diffu-

sion Segregation Phenomenon in Granular Media]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Russian Academy of Sciences]. 2016, vol. 466, no. 1, pp. 30–32. (In Russian)

7. Nadutyy V.P., Lapshin E.S. *Veroyatnostnye protsessy vibratsionnoy klassifikatsii mineral'nogo syr'a* [Probabilistic Processes of Vibration Classification of Mineral Raw Materials]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2005, 178 p. (Proekt «Naukova kniga» [“Scientific Book” Project]) (In Russian)

8. Aloyan R.M., Fedosov S.V., Mizonov V.E. *Teoreticheskie osnovy matematicheskogo modelirovaniya mekhanicheskikh i teplovykh protsessov v proizvodstve stroitel'nykh materialov* [Theoretical Basics of Mathematical Modeling of Mechanical and Thermal Processes in Production of Construction Materials]. Ivanovo, IGASU Publ., 2011, 255 p. (In Russian)

9. Mizonov V.E., Berthiaux H., Gatumel C., Shelatonova K.A. Optimal'noe upravlenie smeshivaniem segregiruyushchikh dispersnykh materialov [Optimal Control of Segregating Dispersed Material Mixing]. *Vestnik IGEU* [Proceedings of Ivanovo State Power University]. 2014, no. 2, pp. 50–54. (In Russian)

10. Balagurov I.A., Mizonov V.E., Mitrofanov A.V. Matematicheskaya model' formirovaniya mnogokomponentnoy smesi segregiruyushchikh komponentov [Mathematical Model of Formation of a Multicomponent Mixture of Segregating Components]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of Higher Educational Institutions. Chemistry and Chemical Technology]. 2014, vol. 57, no. 8, pp. 67–70. (In Russian)

11. Bridgwater J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means — A perspective. *Particuology*. August 2012, vol. 10, issue 4, pp. 397–427.

12. Akulova M.V., Aleshina A.P., Ogurtsov A.I., Ogurtsov A.V. Modelirovanie protsessa klassifikatsii sypuchikh materialov na vibrogrokhotakh s mnogoyarusnoy komponovkoy sit [Modeling of the Process of Classification of Granular Materials Using Multilevel Vibration Screens]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013, no. 2, pp. 80–87. (In Russian)
13. Mizonov V.E., Ogurtsov V.A., Fedosov S.V., Ogurtsov A.V. *Protsessy separatsii chastits v vibroozhizhennom sloe: modelirovanie, optimizatsiya, raschet* [Particle Separation Processes in Vibrofluidized Bed: Modeling, Optimization, Calculation]. Ivanovo, IGEU Publ., 2010, 191 p. (In Russian)
14. Mizonov V.E., Ushakov S.G., Barochkin E.V. *Aerodinamicheskaya klassifikatsiya poroshkov* [Aerodynamic Classification of Powders]. 2nd edition, revised and enlarged. Ivanovo, PresSto Publ., 2014, 259 p. (In Russian)
15. Dehling H.G. A Stochastic Model for Mixing and Segregation in Slugging Fluidized Beds. *Powder Technology*. 2007, vol. 171, issue 2, pp. 118–125.
16. Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. Application of the Theory of Markov Chains to Model Different Processes in Particle Technology. *Powder Technology*, 2005, vol. 157, issues 1–3, pp. 128–137.
17. Mizonov V., Mitrofanov A., Ogurtsov A., Tannous K. Modeling of Particle Concentration Distribution in a Fluidized Bed by Means of the Theory of Markov Chains. *Particulate Science and Technology: An International Journal*. 2014, vol. 32 (2), pp. 171–178.
18. Mizonov V., Zaitsev V., Volynskii V., Leznov V. Modeling the Moisture Content Distribution over a Rotating Porous Cylinder using Markov Chains. *Chemical Engineering & Technology*, 2011, vol. 34, pp. 1185–1190.
19. Pelevin A.E. Veroyatnost' prokhozheniya chastits cherez sito i protsess segregatsii na vibratsionnom grokhote [Probability of Passage of Particles through a Sieve and Process of Segregation on a Vibration Screen]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2011, no. 1, pp. 119–129. (In Russian)
20. Vaysberg L.A., Ivanov K.S. Universal'ny metod opisaniya formy chastits, eyo vliyanie na rezul'taty sitovoy klassifikatsii [Universal Method for Describing the Particles Shape and its Influence on Results of Sieve Classification]. *Obogashchenie rud* [Beneficiation of Ores]. 2014, no. 4 (352), pp. 34–37. (In Russian)
21. Kul'bitskiy A.V. Vliyanie parametrov kolebaniy ploskikh giratsionnykh sortirovok na protsess fraktsionirovaniya shchepy [Influence of Parameters of Oscillations of Flat Gy-ratory Screenings on a Process of Fractionation of Chips]. *Izvestiya Sankt-Petersburgskoy lesotekhnicheskoy akademii : sbornik nauchnykh trudov* [News of Saint-Petersburg Forest Engineering Academy : Collection of Scientific Papers]. Saint-Petersburg, SPbGLTU Publ., 2007, issue 178 (12), pp. 99–105. (In Russian)

About the authors: **Gritsenko Mikhail Alekseevich** — Post-graduate student of Department of technology of building production, **Ivanovo State Polytechnical University**, 20 8th of March st., Ivanovo, 153037, Russian Federation; +7 (4932) 38-01-45; assassin-sunn@mail.ru;

Aleshina Anna Pavlovna — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of Department of building mechanics, **Ivanovo State Polytechnical University**, 20 8th of March st., Ivanovo, 153037, Russian Federation; +7 (4932) 38-01-45; annaricci89@mail.ru;

Brik Ekaterina Romanovna — Candidate of Technical Sciences, Associated Professor of Department of technology of building production, **Ivanovo State Polytechnical University**, 20 8th of March st., Ivanovo, 153037, Russian Federation; +7 (4932) 38-01-45; e_gorohova@list.ru;

Ogurtsov Valeriy Al'bertovich — Doctor of Technical Sciences, Associated Professor, head of Department of technology of building production, **Ivanovo State Polytechnical University**, 20 8th of March st., Ivanovo, 153037, Russian Federation; +7 (4932) 38-01-45; ogurtzovvawork@mail.ru.

For citation: Gritsenko M.A., Aleshina A.P., Brik E.R., Ogurtsov V.A. Issledovanie segregatsii chastits v vibroozhizhennom sloe pri grokhocheni sypuchikh materialov s vysokim sodержaniem melkikh fraktsiy v iskhodnom syr'e [Study of Particle Segregation in Fluidized Bed in the Process of Screening of Granular Materials with High Content of Fine Fractions in Feedstock]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 1 (100), pp. 70–76. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.70-76