

УДК 621.926

**Л. Л. Сотник<sup>1</sup>, Л. А. Сиваченко<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Барановичский государственный университет<sup>2</sup> Белорусско-Российский университет**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ  
СИЛЬВИНИТОВОЙ РУДЫ В ВИБРОВАЛКОВОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ  
НА РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ**

В статье описаны способы силового воздействия на измельчаемый материал в зависимости от его физико-механических свойств. Описана проблема современных предприятий в области измельчения, энергоемкости этого процесса и создания нового оборудования. Представлена конструкция вибровалкового измельчителя. Отличительной особенностью вибровалкового измельчителя, по сравнению с валковыми агрегатами, является эксцентрично установленный валок. Описаны конструкция, рабочий процесс и особенности напряженно-деформированного состояния, создаваемого вибровалковым измельчителем. Представлены параметры конструкции вибровалкового измельчителя, фракционный состав и характеристики измельчаемого материала, средства контроля выходных энергосиловых и качественных показателей процесса. Для сравнения результатов представлена работа конструкции измельчителя в двух режимах: режим пресс-валкового измельчителя и режим вибровалкового измельчителя. В качестве результатов эксперимента представлены графические зависимости гранулометрического состава при измельчении сильвинитовой руды в двух режимах. Представлена сравнительная оценка показателей процесса: потребляемой мощности, производительности, приведенной производительности, степени измельчения и удельных затрат электроэнергии. В заключении представлены преимущества вибровалкового измельчителя, области его использования.

**Ключевые слова:** гранулометрический состав, валковые агрегаты, вибровалковый измельчитель, вибрации, сильвинитовая руда, эксцентриситет, зерна.

**L. L. Sotnik<sup>1</sup>, L. A. Sivachenko<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Baranovichi State University<sup>2</sup> Belarussian-Russian University**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE SILVINITE ORE GRINDING PROCESS  
IN A VIBRAROLL GRINDER AT VARIOUS MODES**

The article describes the methods of force acting on the crushed material, depending on its physical and mechanical properties. The problem of modern enterprises in the field of grinding, energy intensity of this process and the creation of new equipment is described. The design of a vibraroll grinder is presented. A distinctive feature of the vibraroll grinder, in comparison with roll units, is an eccentrically installed roll. The design, the working process and the characteristics of the stress-strain state created by the vibraroll grinder are described. The design parameters of the vibratory grinder, the fractional composition and characteristics of the crushed material, the means of controlling the output power and quality indicators of the process are presented. To compare the results, the work of the design in two modes is presented: the mode of the press-roll grinder and the mode of the vibraroll grinder. As the results of the experiment, graphical dependences of the particle size distribution are presented when grinding sylvinit ore in two modes. A comparative assessment of process indicators is presented: power consumption; performance reduced productivity; the degree of grinding and unit costs of electricity. In conclusion, the advantages of a vibraroll grinder, the field of its use are presented.

**Key words:** grading, roller aggregates, vibraroll grinder, vibrations, sylvinit ore, eccentricity, grains.

**Введение.** Современная отечественная и мировая промышленность не стоит на месте, она ежегодно стремится перейти на более высокие уровни технологичности и производительности. Все это возможно лишь при совместном движении с развивающейся наукой и техникой.

На сегодняшний день среди всего многообразия известных различных способов дезинтеграторной

переработки материалов в дисперсное состояние в промышленности строительных материалов, химической и фармацевтической промышленности наиболее распространенным и простым остается механическое измельчение.

Исходный материал разрушают и измельчают воздействием внешних сил, отличающихся локализацией, направлением и скоростью их приложения [1–3].

Большинство современных измельчителей работает на принципах раскалывания, раздавливания и удара, а также на сочетании этих способов с разламыванием и истиранием.

Выбор способа воздействия на разрушаемый материал зависит от физико-механических свойств материала и крупности его частиц. Для хрупких материалов используются машины с преобладающим раздавливающим и ударным воздействием, для мягких – истирающим. Для измельчения волокнистых материалов эффективны разрывающие воздействия [4, 5].

Помимо физико-механических свойств материала и крупности его частиц выбор того или иного способа разрушения определяется и требованиями к конечной продукции. Для цементной промышленности требуется получить наибольшую поверхность материала, для горнорудной – материал с определенным гранулометрическим составом, в котором отсутствуют переизмельченные частицы, отрицательно влияющие на последующие операции переработки руд [6, 7].

Процессы измельчения исходного сырья и полуфабрикатов в производстве минеральных материалов и смесей являются одними из самых энергоемких. В производстве на них расходуется до 100 кВт·ч/т. При этом на расход электроэнергии значительно влияет увеличение дисперсности полученного продукта [8–10].

Это ведет к необходимости создания новых технологий в переработке минеральных материалов. Поэтому разработка и совершенствование процессов дезинтеграции материалов, конструктивное и технологическое совершенствование дробильного и помольного оборудования является перспективным направлением.

**Основная часть.** Одним из перспективных агрегатов среднего и тонкого помола являются

валковые агрегаты и пресс-валковые измельчители (ПВИ).

Одним из технических решений по модернизации ПВИ является конструкция вибровалкового измельчителя (рис. 1) [11].

Важными эксплуатационными факторами, определяющими качественные и количественные характеристики вибровалкового измельчителя, являются режимные параметры. Наличие эксцентрично установленного валка вносит существенные изменения в напряженно-деформированное состояние материала, вызывает перераспределение контактного давления и, как следствие, изменяет механизмы и интенсивность дезинтеграции [12].

Вибровалковый измельчитель относится к группе кинематических вибрационных машин, т. е. таких машин, у которых ведущее звено имеет вполне определенное абсолютное или относительное движение, зависящее только от геометрических размеров ведущего механизма.

Вибровалковый измельчитель состоит из рамы 1, на которой посредством цапф вала 2 смонтированы ведущий валок 3 и эксцентриковый вал 4 эксцентрикового валка 5. Привод ведущего валка 3 осуществляется от электродвигателя через ременную передачу 6, а ведомого валка – от электродвигателя через ременную передачу 7. Вибрационное воздействие подается на эксцентриковый вал 4 при помощи электродвигателя через ременную передачу 8. На эксцентриковом валу 4 установлены противовесы 9 и 10 для уравнивания системы. Для загрузки и выгрузки материала предусмотрены устройства, выполненные в виде люков. Эксцентриковый вал 4 имеет эксцентриситет  $e$  относительно центральной оси эксцентрикового валка 5.

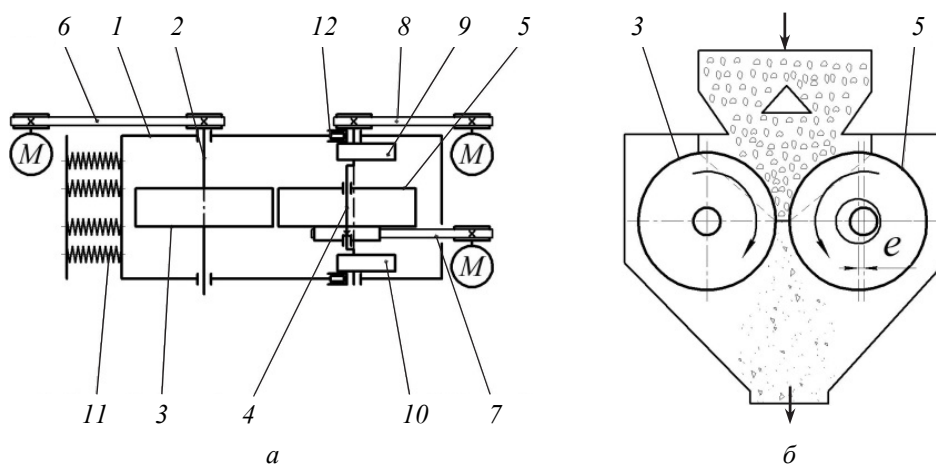


Рис. 1. Схема вибровалкового измельчителя:  
а – вид сверху; б – вид сбоку

Рабочий процесс вибровалкового измельчителя осуществляется следующим образом. Одновременно включаются электродвигатели и приводят во вращение соответствующие элементы конструкции, причем ведущий валок 3 и эксцентрик валок 5 вращаются навстречу друг другу. При этом эксцентриковый вал 4 через опоры сообщает подвижному валку 5 круговые колебания с амплитудой 2e. Через загрузочный люк в межвалковое пространство непрерывным потоком подается подлежащий обработке исходный материал и подвергается интенсивному разрушению путем воздействия на него сжимающего, сдвигового и вибрационного (ударного) усилия.

В процессе работы измельчителя ведущий валок 3 за счет сил трения, возникающих в зоне контакта частиц материала с валком и их захвата внешней поверхностью ведущего валка 3 и реактивного момента, создаваемого силами трения эксцентрикового вала 4, приводит к вращению эксцентрикового валка 5 в направлении, противоположном вращению валка 3, что способствует захвату материала и его принудительному перемещению через межвалковое пространство. При помощи электродвигателя и ременной передачи 7 можно регулировать частоту вращения эксцентрикового валка 5, меняя тем самым интенсивность сдвигового воздействия на материал. При попадании недробимого материала в межвалковое пространство ведущий валок 3 имеет возможность горизонтального сме-

щения при помощи предохранительного устройства в виде системы пружин 11, упирающихся в раму 1. Обработанный таким образом материал удаляется из рабочей зоны агрегата через выгрузной люк.

Для изменения величины межвалкового пространства предусмотрены регулировочные устройства 12.

При изучении характеристик процесса измельчения материалов в вибровалковом измельчителе использовалась сальвинитовая руда, которая относится к анизотропным материалам. Физико-механические характеристики и фракционный состав сальвинитовой руды представлены в табл. 1. Вибровалковый измельчитель имел следующие технические характеристики (табл. 2).

Параметры установки рассчитаны таким образом, чтобы они имели возможность варьирования факторов во всех диапазонах исследований, осуществленных в теоретическом исследовании и в ходе поисковых экспериментов.

Управление установкой осуществлялось с помощью специального пульта управления. Для контроля потребляемой приводом мощности к установке подключен счетчик электрической энергии «Гран-Электро СС-301». Счетчик измеряет и отображает на дисплее значения мощности с погрешностью  $\pm 1$  Вт. Рассев готового продукта проводился на ситовом анализаторе «Вибротехник А-20».

Таблица 1

**Физико-механические характеристики исследуемого материала и фракционный состав**

Материал	Плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>		Прочность при сжатии $\sigma_{сж}$ , МПа		
	Сальвинитовая руда	1900–2100		50–80	
Весовое содержание фракций в %, при размере зерен, мм					
3–5		5–7	7–10	10–15	15–25
10		19	32	31	8

Таблица 2

**Основные технические характеристики вибровалкового измельчителя**

Основные характеристики	Значение параметра		
	ПВИ	Вибровалковый измельчитель	
Режим			
Размеры валков: диаметр, м длина, м		0,25 0,2	
Величина эксцентриситета, м	—	$2 \times 10^{-3}$	
Зазор между валками, м	$3 \times 10^{-3}$	min	$1 \times 10^{-3}$
		max	$5 \times 10^{-3}$
		средний	$3 \times 10^{-3}$
Частота колебаний, Гц/об/мин	—	25/1500	
Окружная скорость ведомого валка, м/с	0,8	0,8	
Окружная скорость вибровалка, м/с	0,64	0,64	
Мощность привода, кВт	$2 \times 4,0$	3,5; $2 \times 4,0$	

Исследование измельчения сильвинитовой руды проводилось на одной установке в двух режимах:

1) режим ПВИ, при отсутствии эксцентриситета ( $e = 0$ ). Процесс измельчения происходит путем сжатия слоя материала, между цилиндрическими измельчающими поверхностями (валками).

2) режим вибровалкового измельчителя по описанной выше модели.

Вибрационные воздействия, реализуемые в вибровалковом измельчителе, обладают рядом достоинств по сравнению с постоянными, используемыми в ПВИ.

Во-первых, это эффект облегчения преодоления сил трения. Этот эффект понимается как особое свойство вибраций снижать, хотя бы частично, силы трения.

Во-вторых, это эффект выигрыша в силе, т. е. возможность преодоления сопротивления с меньшими усилиями при разрушении (деформации) исходного продукта [5, 13].

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе рассматривалась эффективность ПВИ и вибровалкового измельчителя с однократным проходом материала через межвалковое пространство. Для сравнения полученных результатов измельчения сильвинитовой руды были построены графики фракционного состава продукта (рис. 2).

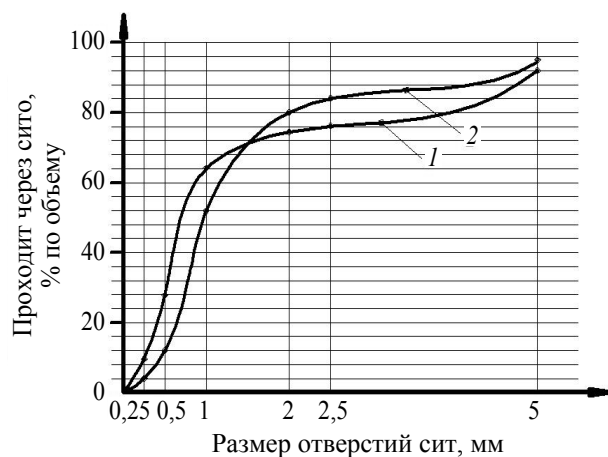


Рис. 2. Фракционный состав при однократном измельчении в режимах ПВИ и вибровалкового измельчителя:

1 – измельчение в режиме ПВИ; 2 – измельчение в режиме вибровалкового измельчителя

Полученные результаты показали, что измельчение сильвинитовой руды как в режиме ПВИ, так и в режиме вибровалкового измельчителя не обеспечивает полного достижения исходного материала заданной фракции. Часть материала после его просева необходимо подвергать повторному измельчению. При этом

следует отметить примерно одинаковое соотношение содержания заданного продукта в измельченном материале.

На втором этапе исследований были проведены опыты по сравнению результатов измельчения при повторном прохождении неизмельченного материала через межвалковое пространство (рис. 3). При проведении данного эксперимента произошло полное дробление исходного материала до заданных размеров, при этом при работе в режиме вибровалкового измельчителя наблюдается меньшая переизмельченность готового продукта.

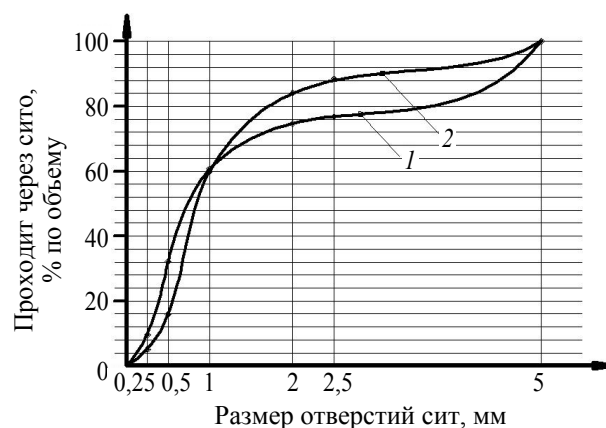


Рис. 3. Фракционный состав при повторном измельчении в режимах ПВИ и вибровалкового измельчителя:

1 – измельчение в режиме ПВИ; 2 – измельчение в режиме вибровалкового измельчителя

Многочисленные опыты показывают, что при оптимальном использовании раздавливающесдвигового и вибрационного деформирования материала, реализуемого в вибровалковом измельчителе, полное раскрытие зерен сильвинитовой руды наблюдается при размере выходной фракции 1–3 мм, соответственно отпадает необходимость измельчения материала до размера 0,8 мм.

Немаловажное значение при проведении экспериментальных исследований на различных режимах оказывает оценка энергосиловых и качественных показателей процесса [13, 14]: потребляемой мощности  $N$ , кВт; производительности  $Q$ , кг/мин; приведенной производительности  $Q_{пр}$ , т/ч; степени измельчения  $E$ , %, и удельных затрат электроэнергии  $q$ , кВт·ч/т. Сравнительная оценка показателей представлена на рис. 4.

Сравнительный анализ двух режимов показывает снижение удельной энергоемкости процесса измельчения в режиме вибровалкового измельчителя, при этом наблюдается рост приведенной производительности и увеличение качества выходной фракции.

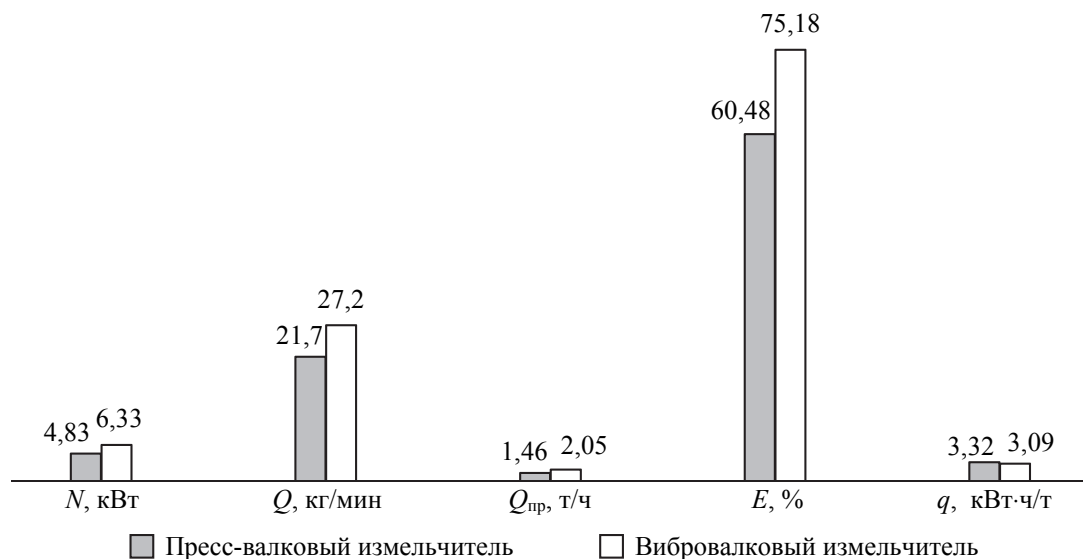


Рис. 4. Сравнительная оценка показателей режимов измельчения

**Заключение.** В научной литературе представлены исследования, связанные с анализом дробления материалов в валковых и пресс-валковых агрегатах, используемых в различных отраслях промышленности. Механизм воздействия на материал в вибровальковом агрегате не описан и вовсе.

Удельный расход электроэнергии на измельчение сильвинитовой руды до заданных размеров в вибровальковом измельчителе по сравнению с используемыми технологиями измельчения в ПВИ снижается до 10% на тонну готового продукта. При этом наблюдается значительный прирост производительности 40%.

Измельчение руды в вибровальковом измельчителе до размера частиц 1–3 мм позволяет

снизить в ней содержание переизмельченной фракции менее 0,25 мм до 1,5–2 раз.

Переизмельченный материал на следующей стадии обработки (обесшламливание) удаляется, что является значительной потерей целевого материала, переходящего в хвосты обогащения. Использование вибровалькового измельчителя, позволяющего произвести полное раскрытие сильвинитовой руды с размером зерен 1–3 мм, позволяет применять более современные технологии его дальнейшего обогащения.

Разработанная конструкция вибровалькового измельчителя может быть использована на предприятиях строительной, горной и химической промышленности.

#### Список литературы

1. Сиденко П. Л. Измельчение в химической промышленности. М.: Химия, 1968. 382 с.
2. Серго Е. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1985. 285 с.
3. Андреев С. Е., Зверевич В. В., Перов В. А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1980. 415 с.
4. Аввакумов Е. Г. Механические методы активации химических процессов. Новосибирск: Наука, 1979. 256 с.
5. Селективное измельчение минералов / В. И. Ревнивцев [и др.]. М.: Недра, 1988. 286 с.
6. Левданский Э. И., Гребенчук П. С., Левданский А. Э. Совершенствование процесса измельчения сильвинитовой руды перед флотацией // Обогащение руд. 2007. № 3. С. 1–7.
7. Гийо Р. Проблема измельчения материалов и ее развитие. М.: Стройиздат, 1964. 111 с.
8. Романович А. А., Колесников А. В. Основы расчета и проектирования пресс-валковых агрегатов для измельчения анизотропных материалов. Белгород: БГТУ, 2011. 165 с.
9. More Than 250 Roller Mills from Polysius in Use Worldwide // World Cement, 2003. Vol. 34, no 4. P. 15.
10. Romanovich A. A. The technology of nano-materials obtaining with using of traditional milling equipment // European Science and Technology. Materials of the III International Research and Practice Conference, Oktober 30–31 2012, Munich, Germany, 2012. P. 233–237.
11. Вибровальковый измельчитель-активатор: пат. 186478 Российская Федерация, МПК В02С 4/32 (2006.01) / В. С. Севостьянов, Л. А. Сиваченко, М. В. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко, Л. Л. Сотник, П. Ю. Горягин; заявитель БГТУ им. В. Г. Шухова; заявл. 20.08.18; опубл. 22.01.19. Бюл. № 3. 9 с.

12. Сотник Л. Л., Сиваченко Л. А. Исследование влияния отдельных факторов на степень измельченности в виброролковом измельчителе методом математического планирования эксперимента // Горная механика и машиностроение. 2018. № 1. С. 30–36.

13. Erdmann P., Adam D. Numerical simulation of dynamic soil compaction with vibratory compaction equipment // *Geotechnics of Roads and Railways: proceedings XV Danube – European Conference on Geotechnical Engineering*, 9–11 Sept. 2014, Vienna, Austria. Vienna, 2014. P. 243–248.

14. Design of a urea granulator with energy optimization / C. Tan [et al.] // *Proceedings of 3rd International Conference on Engineering and ICT*, April 4–5 2012, Melaka, Malaysia, 2012. Vol. 1. P. 187–191.

### References

1. Sidenko P. L. *Izmel'cheniye v khimicheskoy promyshlennosti* [Eruption in industry]. Moscow, Khimiya Publ., 1968. 382 p.

2. Sergo E. E. *Drobleniye, izmel'cheniye i grokhocheniye poleznykh iskopayemykh* [Crushing, grinding and screening of minerals]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 285 p.

3. Andreev S. E., Zverevich V. V., Perov V. A. *Drobleniye, izmel'cheniye i grokhocheniye poleznykh iskopaemykh* [Crushing, grinding and screening of minerals]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 415 p.

4. Avakumov E. G. *Mekhanicheskiye metody aktivatsii khimicheskikh protsessov* [Mechanical methods of activation of chemical processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. 256 p.

5. Revnivtsev V. I., Gaponov G. V., Zarogatskiy L. P. *Selektivnoye izmel'cheniye mineralov* [Selective grinding of minerals]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 286 p.

6. Levdansky E. I., Grebenchuk P. S., Levdansky A. E. Improving the process of grinding sylvinit ore before flotation. *Obogashcheniye rud* [Ore dressing], 2007, no 3, pp. 1–7 (In Russian).

7. Giyo R. *Problema izmel'cheniya materialov i yeye razvitiye* [The problem of grinding materials and its development]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1964. 111 p.

8. Romanovich A. A., Kolesnikov A. V. *Osnovy rascheta i proyektirovaniya press-valkovykh agregatov dlya izmel'cheniya anizotropnykh materialov* [Fundamentals of calculation and design of press-roll aggregates for grinding anisotropic materials]. Belgorod, BSTU Publ., 2011. 165 p.

9. More Than 250 Roller Mills from Polysius in Use Worldwide. *World Cement*, 2003, vol. 34, no 4, p. 15.

10. Romanovich A. A. The technology of nano-materials obtaining with using of traditional milling equipment. *International Conference on European Science and Technology*. Oktober 30–31 2012, Munich, Germany, 2012, pp. 233–237.

11. Sevostyanov V. S., Sivachenko L. A., Sevostyanov M. V., Sivachenko T. L., Sotnik L. L., Goryagin P. Yu. *Vibrovalkovyy izmel'chitel'-aktivator* [Vibroroll grinder-activator]. Patent RF, no. 186478, 2019.

12. Sotnik L. L., Sivachenko L. A. Investigation of the influence of individual factors on the degree of grinding in a vibratory roller mill by the method of mathematical planning of the experiment *Gornaya mekhanika i mashinostroyeniye* [Mining mechanics and mechanical engineering], 2018, pp. 30–36.

13. Erdmann P., Adam D. Numerical simulation of dynamic soil compaction with vibratory compaction equipment. *Geotechnics of Roads and Railways: proceedings XV Danube – European Conference on Geotechnical Engineering*, Sept. 9–11 2014, Vienna, Austria. Vienna, 2014, pp. 243–248.

14. Tan C., Jong E., Keng W., Shaaban A., Kher V. Design of a urea granulator with energy optimization. *Proceedings of 3rd International conference on engineering and ICT*, April 4–5 2012, Melaka, Malaysia, 2012, vol. 1, pp. 187–191.

### Информация об авторах

**Сотник Леонид Леонидович** – старший преподаватель кафедры технологии и оборудования машиностроения. Барановичский государственный университет (225406, г. Барановичи, ул. Домейко, 17/10, Республика Беларусь). E-mail: Sotnikdin037@gmail.com

**Сиваченко Леонид Александрович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспортных и технологических машин. Белорусско-Российский университет (212003, ул. Грушевская, 32, г. Могилев, Республика Беларусь). E-mail: 228011@mail.ru

### Information about the authors

**Sotnik Leonid Leonidovich** – Senior Lecturer, the Department of Technology and Equipment, Mechanical Engineering. Baranavichy State University (17/10, Domeico str., 225406, Baranavichy, Republic of Belarus). E-mail: Sotnikdin037@gmail.com

**Sivachenko Leonid Aleksandrovich** – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Transport and Technological Machines. Belarussian-Russian University (Grushevskaya Str., 32, 212003, Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: 228011@mail.ru

Поступила 10.03.2020