

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 2 (10), 2021

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования
«Барановичский государственный университет».

Адрес редакции:
ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.
Телефон: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Подписные индексы: 00999 — для индивидуальных подписчиков; 009992 — для организаций.
Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включён в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам.

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.

Выходит на русском и английском языках.
Распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой А. Ю. Сидоренко
Технический редактор Л. Н. Щербук
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 03.11.2021. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага ксероксная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 14,50. Уч.-изд. л. 9,30.
Тираж 100 экз. Заказ . Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: Гродненское областное унитарное полиграфическое предприятие «Слонимская типография».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/203 от 07.03.2014, № 2 от 25.02.2014. Адрес: ул. Хлюпина, 16, 231800 г. Слоним, Гродненская обл.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кочурко В. И. (гл. ред. журн.), доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, заслуженный работник образования Республики Беларусь, профессор кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Климук В. В. (зам. гл. ред. журн.), кандидат экономических наук, доцент, первый проректор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Алифанов А. В. (гл. ред. сер.), лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Горбач Ю. Е. (отв. секретарь сер.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Зубрицкая Л. С. (ред. текстов на англ. яз.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Богданович И. А. (отв. за направление «Машиностроение и машиноведение»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Дубень И. В.** (отв. за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Г. И., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь);

Белый А. В., член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Девойно О. Г.**, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий (филиал Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть», Минск, Республика Беларусь);

Дремук В. А., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Жигалов А. Н.**,

кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Калугин Ю. К.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Республика Беларусь);

Карташевич А. Н., доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь); **Клочков А. В.**, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь);

Клубович В. В., академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Сиваченко Л. А.**,

доктор технических наук, профессор (межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь);

Томило В. А., доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь); **Шелег В. К.**, доктор технических наук, профессор

(Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).

Promoter: Educational institution
"Baranovichi State University".

Editorial address:
21 Voykova Str., 225404 Baranovichi.
Phone: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Subscription indices: 00999 — for individual subscribers;
009992 — for companies.
The certificate of the registration of mass media № 1533
of 30.07.2012 issued by the Ministry of Information
of Belarus.

In compliance with the order of the Higher Attestation
Commission of the Republic of Belarus from January 21,
2015 № 16 the scientific and practical journal "BarSU
Herald. Engineering Series" is included into the List of
scientific publications of the Republic of Belarus for
publishing the results of theses research on engineering
sciences (mechanical engineering and machines,
processes and machines of agroengineering systems).

Scientific-and-practical journal "BarSU Herald"
is included into RSCI (Russian Science Citation Index),
license agreement № 06-01/2016.

Issued in Russian and English. The journal is distributed
on the territory of the Republic of Belarus.

Managing editor A. Y. Sidorenko
Technical editor L. N. Scherbuk
Desktop Publishing S. M. Glushak
Proofreader N. N. Kolodko

Signed print 03.11.2021. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 14,50.
Acc.-pub. s. l. 9,30. Circulation of 100 copies.
Order . Free price.

Printing performance: Grodno Regional Printing Unitary
Enterprise "Slonim printing establishment". The state
registration certificate of the publisher, manufacturer and
publications distributor № 1/203 of 07.03.2014, № 2
of 25.02.2014. Address: 16 Hlyupin St., 231800 Slonim,
Grodno region.

EDITORIAL BOARD

Kochurko V. I. (*editor-in-chief*), DSc in Agriculture, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus, Professor of Department of Technical Support of Agricultural Production Processes and Agronomic Sciences (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Klimuk V. V. (*deputy editor-in-chief*), PhD in Economics, Associate Professor, first vice-rector (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Alifanov A. V. (*the series editor-in-chief*), Laureate of the State Prize of the Republic of Belarus in the field of science and technology, Doctor of Technical Sciences, Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Gorbach Yu. E. (*responsible for the topic area "Engineering Sciences"*) (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Zubritskaya L. S. (*ed. of texts in English*) (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Bogdanovich I. A. (*responsible for the area "Mechanical Engineering and Machine Science"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Duben I. V.** (*responsible for the area "Processes and Machines of Agro engineering Systems"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Aniskovich G. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Belarusian State Agrarian Technical University", Minsk, the Republic of Belarus); **Bely A.V.**, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Devoino O. G.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Innovative Research Laboratory of Plasma and Laser Technologies (branch of the Belarusian National Technical University "Research Unit", Minsk, the Republic of Belarus); **Dremuk V. A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Zhigalov A. N.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Kalugin Yu. K.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Yanka Kupala Grodno State University", Grodno, the Republic of Belarus); **Kartashevich A. N.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Educational institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klochkov A.V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (educational institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klubovich V. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Sivachenko L. A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Interstate educational institution of higher education "Belarusian-Russian University", Mogilev, the Republic of Belarus); **Tomilo V. A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus); **Sheleg V. K.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus).

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Алифанов А. В., Милюкова А. М., Ционенко Д. А. Модель воздействия импульсного магнитного поля на изделие из титанового сплава

Булойчик И. А. Анализ изменения структурообразования интерметаллидных слоев на основе цинка при цинковании термоупрочненных стальных изделий диффузионным способом из газовой фазы

Дубень И. В., Дремук В. А. Расчет числа витков пружин кручения

Жигалов А. Н., Горавский И. А. Экспериментальные исследования износа осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим звуковым методом

Жигар В. И., Довгяло В. А., Моисеенко В. Л. Определение экономической эффективности практического применения методов повышения производительности звеносборочной линии КБ03

Качанов И. В., Филипчик А. В., Шаталов И. М., Булыга Д. М., Ковалевич В. С., Недвецкий С. В., Денисов В. А. Гидроабразивная технология очистки металлических поверхностей гребных винтов от коррозии

Михайлов М. И., Тетерич Н. Э., Воробей В. И. К вопросу о диагностике резцов по силе резания в условиях роботизированного технологического комплекса

Сиваченко Л. А., Абдукаликова Г. М., Сотник Л. Л., Дыдышко И. М. Проблемы, задачи и пути развития пружинных технологических аппаратов

Сотник Л. Л., Русан С. И., Сиваченко Л. А. Анализ пропускной способности вибровалкового измельчителя с переменными параметрами движения вала

Чаевский В. В., Кулешов А. К., Рудак П. В., Барчик С., Коледа П. Влияние ионно-плазменной обработки лезвий ножей на режущую способность фрезы при фрезеровании древесины

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Дубень И. В. Агротехническая и энергетическая оценка работы плужных корпусов с углоснимами

Крупенин П. Ю. Анализ фазового портрета пульсаций доильного аппарата

Филиппов А. И., Лещик С. Д., Калугин Ю. К., Дубень И. В. Исследование и разработка модели по оптимизации процесса разбрасывания удобрений

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

4 Alifanov A. V., Miliukova A. M., Tsionenko D. A. Model of impact of pulsed magnetic field on titanium alloy product

12 Bulochyk I. A. Analysis of changes in the structure formation of zinc-based intermetallic layers during galvanizing of heat-hardened steel products by diffusion method from the gas phase

17 Duben I. V., Dremuk V. A. Calculation of the number of torsion springs

24 Jigalov A. N., Goravskii I. A. Experimental study of the wear of an axial milling tool made of high-speed steel R6M5, hardened by aerodynamic sound method

42 Zhihar V. I., Dovgualo V. A., Moiseenko V. L. determination of economic efficiency of practical application of methods for improving the productivity of the link assembly line KB03

51 Kachanov I. V., Filipchik A. V., Shatalov I. M., Bulyga D. M., Kovalevich V. S., Nedvetsky S. V., Denisov V. A. Hydro-abrasive technology for cleaning metal surfaces of propellers from corrosion

60 Mikhailov M. I., Teterich N. Э., Vorobei V. I. To the question of cutters diagnostics by cutting force in conditions of a robotic technological complex

67 Sivachenko L. A., Abdalikova G. M., Sotnik L. L., Dydyshko I. M. Problems, tasks and ways of development of spring technological apparatus

78 Sotnik L. L., Rusan S. I., Sivachenko L. A. Analysis of the throughput of a vibrating grinder with variable parameters of the roll movement

88 Chayevski V. V., Kuleshov A. K., Rudak P. V., Barcik Š., Koleda P. The effect of ion-plasma treatment of the blades on the cutting ability of the milling cutter during wood milling

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

95 Duben I. V. Agrotechnical and energy assessment of the work of plough bodies with trashboard

102 Krupenin P. Y. Analysis of the phase portrait of milking machine pulsations

108 Filippov A. I., Leshchik S. D., Kalugin Yu. K., Duben I. V. Research and development of a model for optimizing the fertilizer spreading process

УДК 621.926.32

Л. Л. Сотник¹; С. И. Русан¹, кандидат технических наук, доцент;**Л. А. Сиваченко²**, доктор технических наук, профессор¹Учреждение образования «Барановичский государственный университет, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 803 45 28, Sotnikdin037@gmail.com²Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», ул. Грушевская, 32, 212003 Могилев, Республика Беларусь, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru

АНАЛИЗ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВИБРОВАЛКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДВИЖЕНИЯ ВАЛКА

В статье представлены результаты аналитических исследований пропускной способности вибровалкового измельчителя с переменными параметрами движения эксцентрикового валка. Пропускная способность вибровалкового агрегата сравнивается с валковым агрегатом. Отличительной особенностью вибровалкового измельчителя является эксцентрично установленный валок. Проведен анализ влияния на производительность геометрических (величина эксцентриситета e) и технологических (коэффициент соотношения скоростей валков k_v и частота вращения эксцентрикового вала $n_{эв}$) параметров. Дана оценка влияния геометрических и технологических параметров на производительность вибровалкового агрегата с гармоническим законом движения валка.

Ключевые слова: вибровалковый измельчитель; производительность; измельчение материалов; эксцентриситет; зазор; валки.

Рис. 8. Библиогр.: 16 назв.

L. L. Sotnik¹; S. I. Rusan¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor;**L. A. Sivachenko²**, Doctor of Technical Sciences, Professor¹ Educational institution "Baranovichi State University", 21 Voykova Str., 225406 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 803 45 28, Sotnikdin037@gmail.com² Inter-State Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", 32 Grushevskaya Str., 212003 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru

ANALYSIS OF THE THROUGHPUT OF A VIBRATING GRINDER WITH VARIABLE PARAMETERS OF THE ROLL MOVEMENT

The article presents the results of analytical studies of the throughput of a vibratory roll grinder with movement variable parameters of an eccentric roll. The throughput capacity of the vibratory roller unit is compared with the roller unit. A distinctive feature of the vibratory roll grinder is the eccentrically mounted roll. The analysis of the impact on the performance of geometric (the value of eccentricity e) and technological (roll speeds ratio k_v and the rotation frequency of the eccentric shaft $n_{эв}$) parameters has been carried out. An assessment of the influence of geometric and technological parameters on the performance of a vibratory roll unit with a harmonic law of roll motion is given.

Key words: vibratory roll grinder; productivity; material crushing; eccentricity; gap; rolls.

Fig. 8. Ref.: 16 titles.

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 сегодня среди всего многообразия известных 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, что оказывает влияние на производительность этих агрегатов [1—4].

Оценка величины производительности вибровалкового измельчителя при внедрении в производственные линии имеет существенное значение. Величина производительности оказывает влияние на энергозатраты процесса измельчения различных материалов.

В валковых мельницах согласно [5—8] производительность зависит от физико-механических характеристик материала и геометрических параметров валков.

Материалы и методы исследования. На основе проведенного анализа классификаций, развития и совершенствования валковых мельниц разработана новая конструкция валковой мельницы с дополнительным вибрационным воздействием на измельчаемый материал. Сфера ее возможного применения определяется теми возможностями вибраций, которые известны сегодня [7; 9; 10].

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 (рисунок 1) состоит из рамы 1, на которой в соответствующих опорах посредством цапф вала 2 смонтирован 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 [8; 11; 12].

Рабочий процесс вибровалкового измельчителя осуществляется следующим образом. Одновременно включаются электродвигатели и приводят во вращение соответствующие элементы конструкции, причем ведущий валок 3 и эксцентриковый валок 5 вращаются навстречу друг другу.

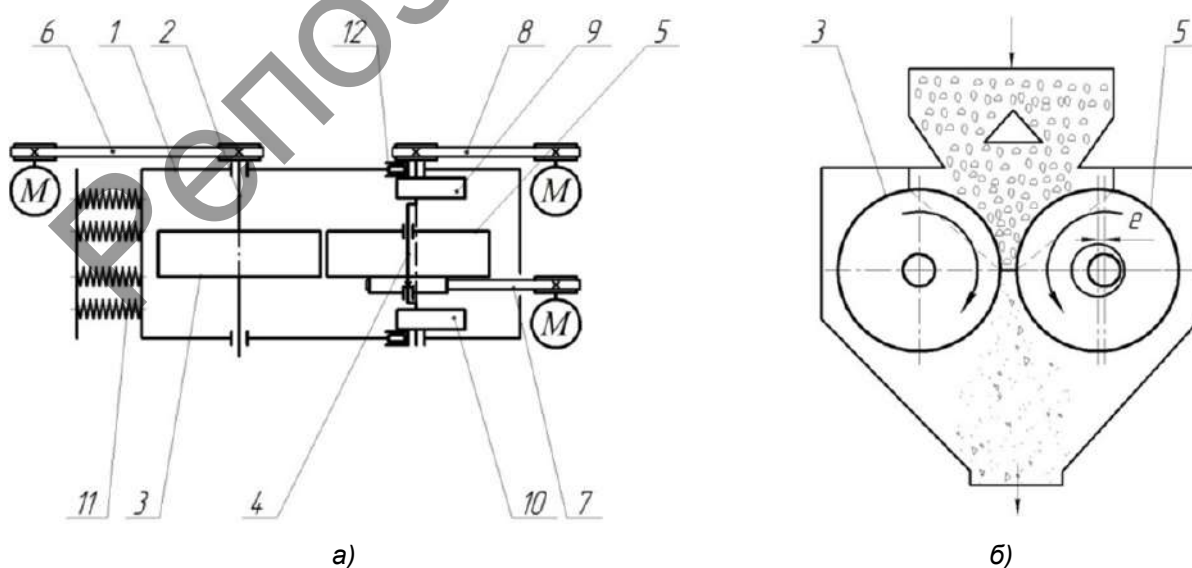


Рисунок 1. — Схема вибровалкового измельчителя: а — вид сверху; б — вид сбоку

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 путём воздействия на него сжимающего, сдвигового и вибрационного (ударного) усилий.

В процессе работы измельчителя ведущий валок 3 за счёт 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 смещения 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.

Вибрационные воздействия, реализуемые в вибровалковом измельчителе, обладают рядом достоинств по сравнению с постоянными воздействиями, используемыми в пресс-валковых измельчителях. Во-первых, это эффект облегчения преодоления сил трения. Этот эффект понимается как особое свойство вибраций уничтожать, хотя бы частично, силы трения, а также обеспечивает более равномерное распределение материала по длине валка. Во-вторых, это эффект выигрыша в силе, т. е. возможность преодоления сопротивления с меньшими усилиями при разрушении (деформации) исходного продукта и, следовательно, увеличение производительности измельчителя [13; 14].

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ пропускной способности с переменными параметрами движения валка. Для анализа производительности вибровалкового измельчителя рассмотрим ряд моделей движения валка.

В качестве модели для исследования рассматривается межвалковое пространство 1 прямоугольной формы размером $B \times b_{\max}$, находящийся в горизонтальной плоскости (рисунок 2, а).

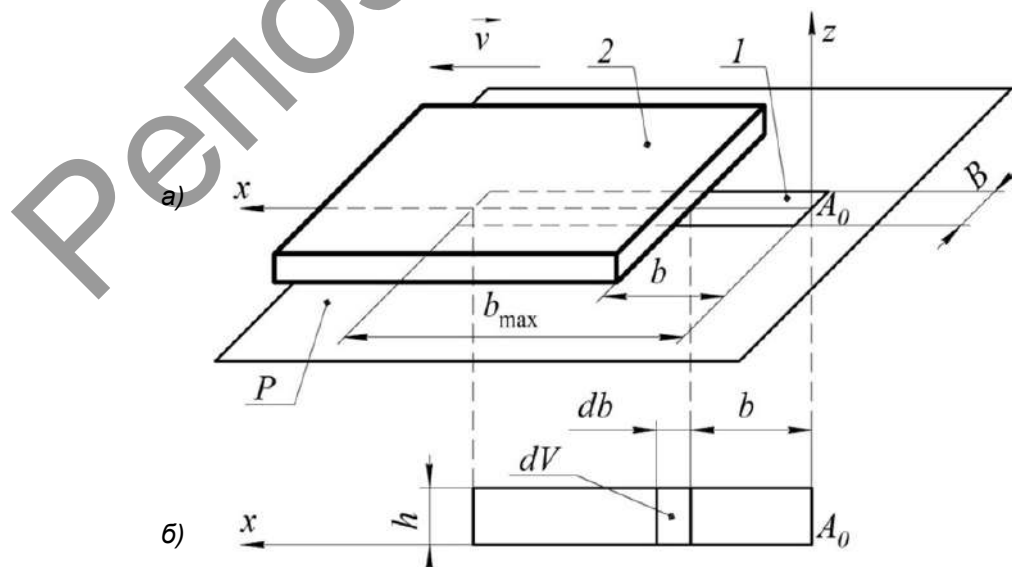


Рисунок 2. — Модель зазора и эпюра изменения объема в эталонном варианте

Пластина 2 (часть вала) может двигаться вдоль оси A_0x и частично или полностью закрывать или открывать зазор 1. Движение пластины происходит одновременно с перемещением материала через открытую часть зазора. Считаем, что материал перемещается с постоянной скоростью v_1 с бункера, находящегося над плоскостью P , вниз. Плоскость P является сечением вала по его оси.

Определим пропускную способность зазора 1 в зависимости от закона движения пластины 2. Рассматриваются три закона движения $b = b(t)$: равномерный, равнопеременный и гармонический. Для сравнительного анализа определяется и объем материала, перемещаемого через весь зазор $B \times b_{\max}$ без пластины за единицу времени (эталонный вариант). Время (продолжительность) перемещения материала на любом элементарном участке Δb зазора обозначим как τ . В общем случае τ — величина переменная: $\tau = \tau(t)$, где t время движения пластины к рассматриваемому участку Δb зазора. На участках, где зазор открывается раньше, продолжительность перемещения τ вещества через зазор больше.

Во всех указанных вариантах движения пластины время до полного открытия зазора, т. е. ее перемещение на расстояние b_{\max} , обозначим как t_1 . Такое же время принимаем и для продолжительности перемещения материала через зазор в эталонном варианте. Для него эпюра, характеризующая изменение объема перемещаемого через зазор материала по ее длине b_{\max} , представленное на рисунке 2, б, в виде прямоугольника; его сторона $h = v_1 t_1$ — высоты слоя материала, который переместился под плоскость P . Горизонтальное сечение слоя равно Bdb , его объем $dV = Bdbh$, объем всего просыпанного через зазор материала $V = \int_0^{t_1} Bhdb$ или $V = Bb_{\max} v_1 t_1$.

Для сравнения пропускных способностей различных типов зазоров удобнее пользоваться характеристикой производительности Q ($\text{м}^3/\text{ч}$):

$$Q = \frac{V}{t_1} \quad (1)$$

Таким образом, производительность агрегата с зазором без пластины равна $Q = Bb_{\max} v_1$, при условии, что скорость измеряется в $\text{м}/\text{ч}$, а размеры B и b — в метрах.

Исследование зазора с подвижными пластинами. На рисунке 3, а, пластина 2 движется со скоростью v влево. В момент времени t она находится на расстоянии b от начала A_0 зазора 1.

На рисунке 3, б, показана эпюра изменения объема материала, пересыпающегося под плоскость P (которая проецируется на рисунке в линию A_0x). Ординаты эпюры пропорциональны длительности τ пересыпания материала через соответствующий участок зазора.

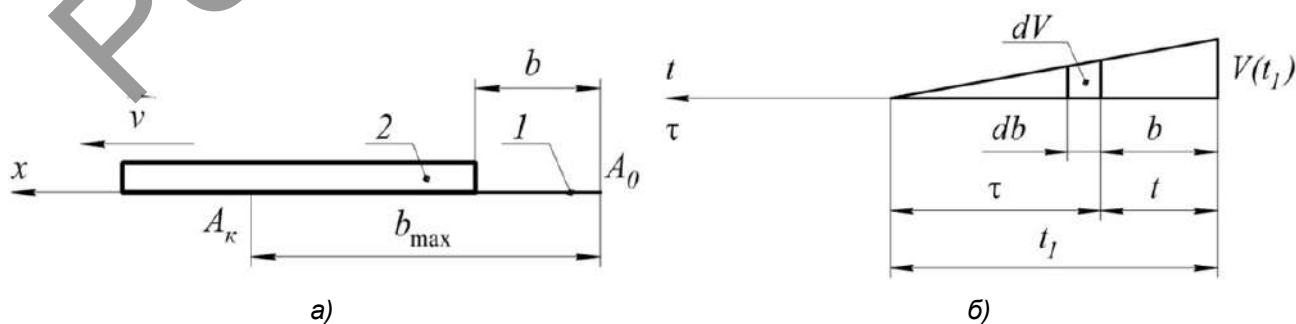


Рисунок 3. — Боковая проекция зазора и эпюр изменения объема в варианте с подвижной пластиной

Наибольший объем вещества $V(t_1)$ успевает переместиться через участок Δb , прилегающий к точке A_0 в момент времени $t = t_1$ (когда открывается весь зазор). Элементарный объем материала, который перемещается через участок зазора db за время τ ,

$$dV = Bdbv_1\tau, \quad (2)$$

где $\tau = t_1 - t$ (см. рисунок 3, б).

Пластина движется равномерно. Скорость ее движения $v = \text{const}$, по закону движения $b = vt$, $db = vdt$.

По выражению (2) находим $dV = Bvv_1(t_1 - t)dt$;

$$V = \int_0^{t_1} Bvv_1(t_1 - t)dt = Bvv_1 \int_0^{t_1} (t_1 - t)dt = ct_1 \int_0^{t_1} dt - c \int_0^{t_1} tdt = c \left(t \Big|_0^{t_1} - \frac{1}{2}t^2 \Big|_0^{t_1} \right) = \frac{1}{2}ct_1^2,$$

где $c = Bvv_1$.

$$\text{Величина } t_1 = \frac{b_{\max}}{v}, \text{ тогда } V = \frac{1}{2}c \left(\frac{b_{\max}}{v} \right)^2.$$

$$\text{Окончательно получаем } V = \frac{1}{2}Bvv_1t_1.$$

Следовательно,

$$Q = \frac{1}{2}Bb_{\max}v_1. \quad (3)$$

Пластина движется равноускоренно. Ее ускорение $a = \text{const}$, скорость $v = at$. Поскольку $v = db/dt$, то $db = vdt = atdt$. Подставляем db в формулу (2):

$$dV = Bv_1at(t_1 - t)dt = c_1t(t_1 - t)dt,$$

где $c_1 = Bv_1a$.

Определим объем перемещаемого материала:

$$V = c \int_0^{t_1} t(t_1 - t)dt = c \left(t_1 \int_0^{t_1} tdt - \int_0^{t_1} t^2 dt \right) = c \left(t_1 \frac{1}{2}t^2 \Big|_0^{t_1} - \frac{1}{3}t^3 \Big|_0^{t_1} \right) = \frac{1}{6}ct_1^3 = \frac{1}{6}ct_1^2t_1.$$

$$\text{Зная, что } b_{\max} = \frac{at_1^2}{2}, \text{ определяем } t_1^2 = \frac{2b_{\max}}{a}.$$

Следовательно, объем перемещаемого материала

$$V = \frac{1}{6}c \left(\frac{2b_{\max}}{a} \right) t_1 = \frac{1}{3}Bb_{\max}v_1t_1,$$

откуда

$$Q = \frac{1}{3}Bb_{\max}v_1. \quad (4)$$

Пластина движется по гармоническому закону. Будем считать, что пластина приводится в движение при помощи кривошипно-шатунного механизма O_2MA (рисунок 4).

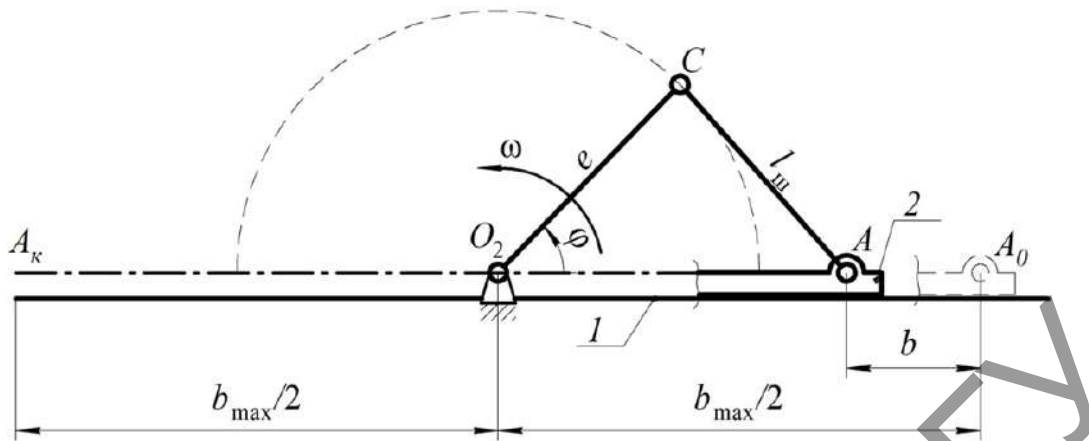


Рисунок 4. — Модель зазора с движением пластины по гармоническому закону

Ось вращения O_2 кривошипа O_2M устанавливаем посередине длины зазора $A_0O_2 = O_2A_K = b_{max} / 2$. Принимаем длины кривошипа (эксцентриситет) и шатуна одинаковыми ($l_{ш} = e$), а угловую скорость ω кривошипа постоянной, тогда его угол поворота $\varphi = \omega t$. Из рисунка 4 определяем $b = 2e(1 - \cos \omega t)$.

Следовательно,

$$\frac{db}{dt} = 2e\omega \sin \omega t.$$

Согласно выражению (2) получаем:

$$dV = B(2e\omega \sin \omega t) v_1 (t_1 - t) dt = c_2 (t_1 \sin \omega t - t \sin \omega t) dt,$$

где $c_2 = 2Be\omega v_1$.

Для определения V необходимо определить интеграл от члена $t \sin \omega t$, находим V путем интегрирования по частям:

$$\int t \sin \omega t dt = \frac{\sin \omega t}{\omega^2} - \frac{t \cos \omega t}{\omega}.$$

Таким образом,

$$V = c_2 \left[\left(\frac{t_1}{\omega} \right) (-\cos \omega t) \Big|_0^{t_1} - \left(\frac{\sin \omega t}{\omega^2} - \frac{t \cos \omega t}{\omega} \right) \Big|_0^{t_1} \right].$$

Учитывая, что $\omega t_1 = \pi$ и $2e = b_{max} / 2$, окончательно получаем:

$$V = \frac{1}{2} B v v_1 t_1,$$

где $t_1 = \pi / \omega$.

Отсюда определяем производительность:

$$Q = \frac{1}{2} B b_{max} v_1. \quad (5)$$

Углубленное исследование свойств зазора A_0A_K с гармоническим законом движения пластины позволяет установить его интересную особенность: левая половина O_2A_K обладает чуть ли не вдвое большей пропускной способностью, чем правая.

В момент времени $t = t_1$, когда кривошип повернется на угол π , открыт весь зазор, далее его пропускная способность определяется выражением (1). Но если кривошип без остановки продолжит движение, то зазор начнет закрываться. Продолжительность закрывания t_1 и объем перемещаемого за это время материала V такие же, как и при открытии.

Сравнивая пропускные характеристики выражений (3), (4), (5) с эталонной (1) и между собой, устанавливаем, что они существенно зависят от законов движения пластины. Разработанная здесь общая методика исследования пропускных способностей переменных во времени зазоров позволяет исследовать и другие варианты устройств. Для дальнейшего исследования принимаем движение валков по гармоническому закону.

Анализ производительности вибровалкового измельчителя с учетом характеристик материала. Производительность вибровалкового измельчителя (рисунок 5) зависит от следующих показателей [7; 11]:

$$Q = Bb_{\text{ср}}v_{\text{вв}}k_v\mu k_{\text{упл}}k_{\text{пр}}\rho_0k_{\text{виб}}k_e, \quad (6)$$

где $v_{\text{вв}}$ — окружная скорость вращения ведущего валка, м / с;

k_v — коэффициент соотношения частот вращения ($k_v = 0,85 \dots 1,0$) [11];

$k_{\text{пр}}$ — коэффициент проскальзывания шихты (для гладких валков $k_{\text{пр}} = 0,6 \dots 0,8$) [5];

ρ_0 — насыпная плотность материала, кг / м³;

$k_{\text{виб}}$ — коэффициент скорости вращения эксцентрикового вала ($k_{\text{виб}} = 1,0 \dots 1,25$);

k_e — коэффициент величины эксцентриситета ($k_e = 1,0 \dots 1,15$) [11; 14].

Коэффициенты соотношения частот вращения, скорости вращения эксцентрикового вала, величины эксцентриситета определяются в результате поисковых экспериментов [11; 14], для теоретического расчета их значения принимаем равным единице [7; 11; 14; 15].

Скорость вращения валков

$$v_{\text{вв}} = \pi D n_{\text{вв}}, \quad (7)$$

где $n_{\text{вв}}$ — скорость вращения ведущего валка, об. / мин.

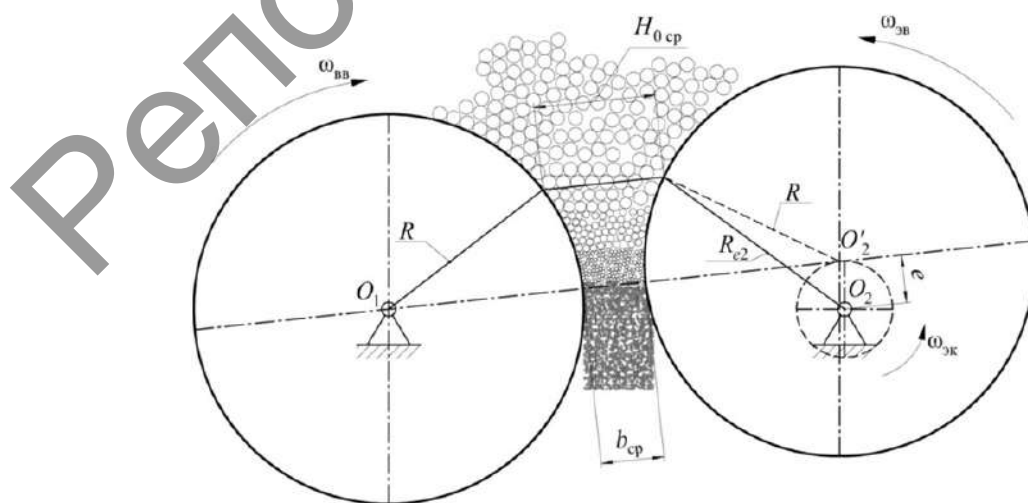


Рисунок 5. — Схема определения производительности вибровалкового измельчителя

Коэффициент уплотнения шихты

$$k_{\text{упл}} = \frac{H_{0 \text{ ср}}}{b_{\text{ср}}} = \frac{2R(1 - \cos \alpha_{\text{д ср}}) + b_{\text{ср}}}{b_{\text{ср}}} = \frac{D(1 - \cos \alpha_{\text{д ср}})}{b_{\text{ср}}} + 1. \quad (8)$$

С учетом приведенных выражений (7) и (8) выражение (6) принимает следующий вид:

$$Q = B b_{\text{ср}} \pi D n_{\text{вв}} k_v \mu k_{\text{пр}} \rho_0 k_{\text{виб}} k_e \left[\frac{D(1 - \cos \alpha_{\text{д ср}})}{b_{\text{ср}}} + 1 \right]. \quad (9)$$

Анализ выражения (9) показывает, что производительность процесса измельчения вибровалкового измельчителя с эксцентрично установленным валком зависит от: конструктивных параметров измельчителя (геометрические размеры валков D и B , ширина зазора b и эксцентриситета e); технологических показателей процесса (частоты вращения ведущего валка $n_{\text{вв}}$, частоты вращения эксцентрикового вала $n_{\text{эв}}$); физико-механических характеристик материала (степени разрыхленности материала μ и его насыпной плотности ρ_0).

Качественной оценкой работы измельчителя является приведенная производительность, которая может быть определена по выведенной экспериментально формуле Розина—Раммлера [16]:

$$Q_{50} = Q \lg \left(10^m \sqrt{\frac{E\%}{50}} \right),$$

где m — поправочный коэффициент, зависящий от свойств материала [16].

Определим теоретическую производительность вибровалкового измельчителя на основании следующих параметров: $B = 0,05$ м, $D = 0,24$ м, $b_{\text{мин}} = 0,002$ м, $e = 0,002$ м, $n = 120$ мин⁻¹, $\rho_0 = 1400$ кг / м³, $k_{\text{пр}} = 0,7$, $\mu = 0,3$:

$$Q = 0,05 \cdot 0,004 \cdot 3,14 \cdot 0,24 \cdot 120 \cdot 1 \cdot 0,3 \cdot 0,7 \cdot 1400 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \left[\frac{0,24(1 - \cos 14)}{0,004} + 1 \right] = 14,9 \text{ кг / мин.}$$

Тогда приведенная производительность вибровалкового измельчителя по формуле Розина—Раммлера

$$Q_{50} = 14,9 \lg \left(10^{0,9} \sqrt{\frac{60}{50}} \right) = 16,21 \text{ кг / мин, или } Q_{50} = 0,97 \text{ т / ч.}$$

Построим график изменения производительности Q в зависимости от величины коэффициента соотношения частот вращения валков k_v для различных материалов (рисунок 6).

Построим график изменения производительности в зависимости от частоты вращения эксцентрикового вала $n_{\text{эв}}$ (рисунок 7).

Аналогичным образом построим график зависимости производительности Q от величины эксцентриситета e (рисунок 8).

Расчетные зависимости (см. рисунки 6—8) показывают, что все варьируемые параметры позволяют менять расчетную производительность вибровалкового измельчителя. Изменение коэффициента соотношения скоростей вращения незначительно снижает производительность (до 10 %), а частота колебаний эксцентрикового валка и величина эксцентриситета позволяют увеличить производительность до 20 %.

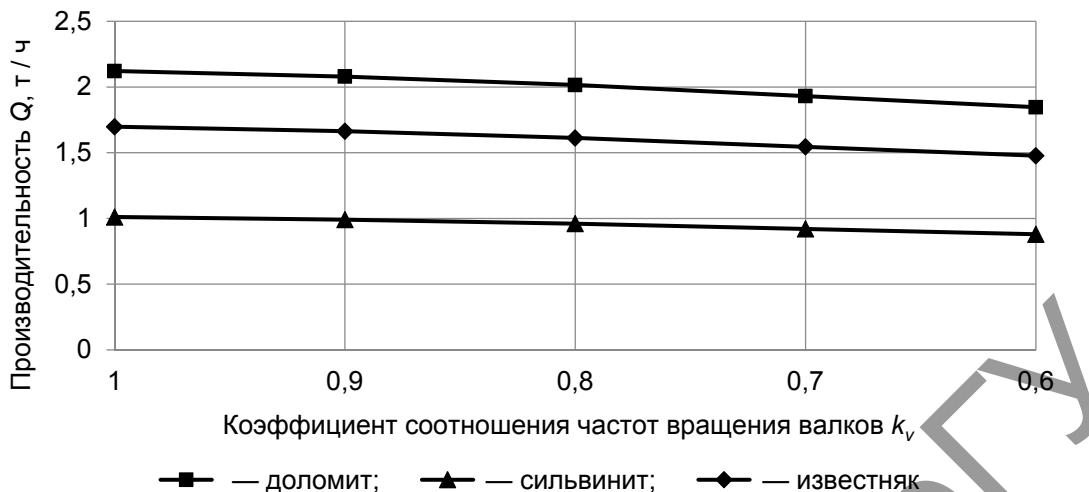


Рисунок 6. — Зависимость влияния величины коэффициента соотношения частот вращения валков k_v на производительность Q

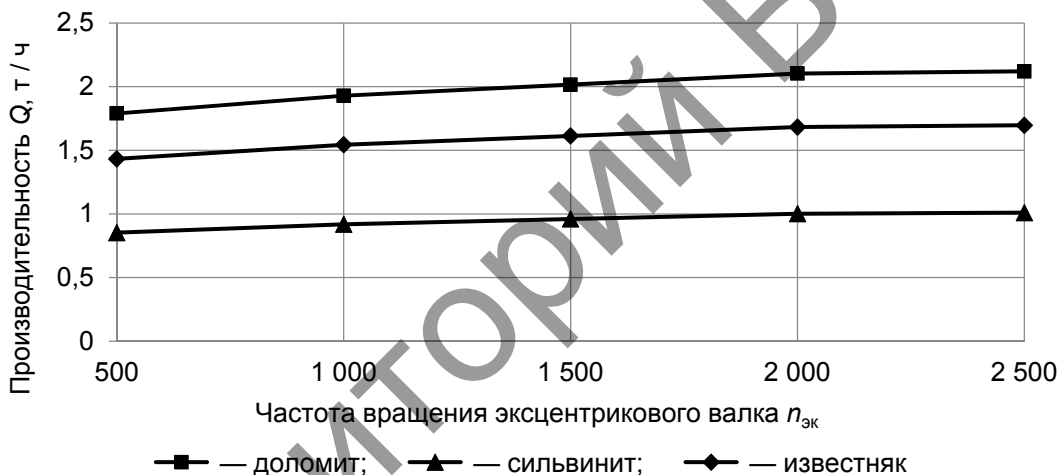


Рисунок 7. — Зависимость влияния частоты вращения эксцентрикового вала $n_{эк}$ на производительность Q

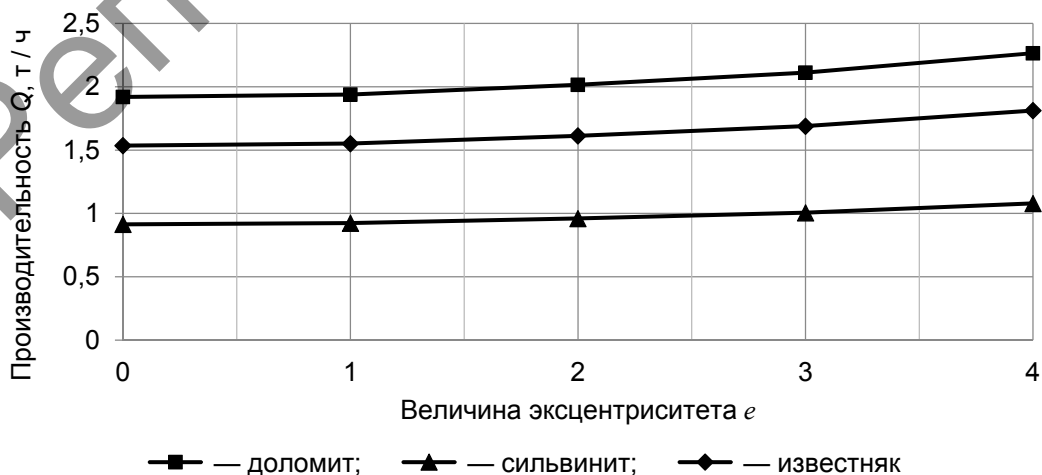


Рисунок 8. — Зависимость влияния величины эксцентриситета e на производительность Q

Закключение. Представленные аналитические выражения и графические зависимости показывают целесообразность использования вибровалкового измельчителя с переменными параметрами движения валка, а также варьирование параметрами: скорости вращения валков, частоты вращения эксцентрикового вала и величины эксцентриситета [7; 11; 14].

Получены аналитические выражения для расчета производительности при измельчении материалов в вибровалковом измельчителе, а также для расчета приведенной производительности в зависимости от технологических и геометрических параметров измельчителя. Полученные зависимости показывают, что наличие эксцентрично установленного валка позволяет повысить производительность до 20 %, но это нуждается в практическом экспериментальном исследовании.

Проведенный анализ производительности в зависимости от варьируемых факторов показал актуальность исследований и необходимость проведения экспериментальных исследований в этом направлении.

Список цитируемых источников

1. Сиденко, П. Л. Измельчение в химической промышленности / П. Л. Сиденко. — М. : Химия, 1968. — 382 с.
2. Серго, Е. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых : учеб. для вузов / Е. Е. Серго. — М. : Недра, 1985. — 285 с.
3. Андреев, С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых : учеб. для вузов по специальности «Обогащение полезных ископаемых» / С. Е. Андреев, В. В. Зверевич, В. А. Перов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Недра, 1980. — 415 с.
4. Селективное измельчение минералов / В. И. Ревнивцев [и др.] — М. : Недра, 1988. — 286 с.
5. Поникоров, И. И. Расчет машин и аппаратов химических производств и нефтепереработки (примеры и задачи) : учеб. пособие / И. И. Поникоров, С. И. Поникоров, С. В. Рачковский. — М. : Альфа-М, 2008. — 720 с.
6. Романович, А. А. Основы расчета и проектирования пресс-валковых агрегатов для измельчения анизотропных материалов : монография / А. А. Романович, А. В. Колесников. — Белгород : БГТУ, 2011. — 165 с.
7. Сотник, Л. Л. К вопросу анализа производительности вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород, 2018. — Вып. XVII. — С. 360—365.
8. Сотник, Л. Л. Методика расчета конструктивных и технологических параметров вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : межвуз. сб. ст. — Белгород, 2019. — Вып. XVIII. — С. 162—167.
9. Erdmann, P. Numerical simulation of dynamic soil compaction with vibratory compaction equipment / P. Erdmann, D. Adam // Geotechnics of Roads and Railways : proceedings XV Danube — European Conference on Geotechnical Engineering, 9—11 Sept. 2014, Vienna, Austria. — Vienna, 2014. — P. 243—248.
10. Tan, C. Design of a urea granulator with energy optimization / C. Tan // Proceedings of 3rd International conference on engineering and ICT, 4—5 April 2012, Melaka, Malaysia. — 2012. — Vol. 1. — P. 187—191.
11. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия : коллектив. моногр. / Л. А. Сиваченко [и др.] ; под науч. ред. Л. А. Сиваченко ; М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т. — Барановичи : БарГУ, 2020. — 359 с.
12. Вибровалковый измельчитель-активатор : пат. 186478 Рос. Федерации : В02С4/32 / В. С. Севостьянов [и др.] ; заявл. 20.08.2018 ; дата публ.: 22.01.2019.
13. Гончаревич, И. Ф. Вибротехника в горном производстве / И. Ф. Гончаревич. — М. : Недра, 1992. — 319 с.
14. Сотник, Л. Л. Анализ результатов исследований зависимости производительности от основных факторов вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2018. — Вып. 6. — С. 81—86.
15. Сотник, Л. Л. Изучение влияния технологических факторов на потребляемую мощность вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко, И. А. Богданович // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. «Машиностроение». — 2018. — № 4. — С. 19—22.
16. Романович, А. А. Энергосберегающие агрегаты для измельчения материалов цементного производства с анизотропной текстурой : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.13 / А. А. Романович. — Белгород, 2014. — 398 л.

Поступила в редакцию 13.10.2021.