

# ВЕСЦІ

## НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

---

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2020. Т. 65, № 4

---

# ИЗВЕСТИЯ

## НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

---

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2020. Т. 65, № 4

---

Журнал основан в 1956 г. как «Весці Акадэміі навук БССР. Серыя фізіка-тэхнічных навук», с 1992 г. – «Весці Акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук», с 1998 г. – современное название

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь, свидетельство о регистрации № 391 от 18 мая 2009 г.

*Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)*

Главный редактор

**Сергей Антонович Чижик** –

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия

**А. П. Ласковнёв** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь (*заместитель главного редактора*)

**И. А. Старостина** (*ведущий редактор журнала*)

**А. В. Белый** – Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

**П. А. Витязь** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**А. Я. Григорьев** – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

**В. Г. Залесский** – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**А. Ф. Ильющенко** – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии –  
Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Беларусь  
**С. М. Костромицкий** – Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**Л. Г. Красневский** – Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Беларусь  
**А. П. Крень** – Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**А. М. Малярович** – Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь  
**Н. К. Мышкин** – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной  
академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь  
**О. Г. Пенязков** – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук  
Беларуси, Минск, Беларусь  
**В. М. Федосюк** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,  
Минск, Беларусь  
**М. Л. Хейфец** – Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Р е д а к ц и о н н ы й с о в е т

**С. Воденичаров** – Болгарская академия наук, София, Болгария  
**Ю. Гавлик** – Институт технологии машиностроения и автоматизации производства Краковской  
политехники (Технологический университет), Краков, Польша  
**Г. Жинтялис** – Литовская академия наук, Вильнюс, Литва  
**Б. Каталинич** – Международная инженерная академия, Технический университет Вены, Вена, Австрия  
**А. А. Михалевич** – Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**А. Г. Наумовец** – Национальная академия наук Украины, Киев, Украина  
**К. А. Солнцев** – Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова, Москва, Россия  
**Л. Танович** – Белградский университет, Белград, Сербия  
**Б. М. Хрусталёв** – Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

*Адрес редакции:*  
*ул. Академическая, 1, к. 118, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.*  
*Тел.: + 375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru*  
*vestift.belnauka.by*

---

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2020. Т. 65, №4

*Выходит на русском, белорусском и английском языках*

---

Редактор *И. А. Старостина*  
Компьютерная верстка *А. В. Новик*

Подписано в печать 22.12.2020. Выход в свет 29.12.2020. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 70 экз. Заказ 218.  
Цена номера: индивидуальная подписка – 12,32 руб., ведомственная подписка – 29,31 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/18 от 02.08.2013. ЛП № 02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск, Республика Беларусь

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука»,  
Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2020

# PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

---

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2020, vol. 65, no. 4

---

The Journal was founded in 1956 under the titles  
“Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR. Physical-technical series”,  
since 1992 – “Proceedings of the Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series”,  
since 1998 – it comes under its actual title

Issued four times a year

Founder is the National Academy of Sciences of Belarus

The Journal was registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus  
in the State Registry of Mass Media, reg. no. 391

*The Journal is included in The List of Journals for Publication of the Results  
of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the database  
of Russian Science Citation Index (RSCI)*

E d i t o r - i n - C h i e f

**Sergei A. Chizhik** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

E d i t o r i a l B o a r d

**Alexander P. Laskovnev** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
(Associate Editor-in-Chief)

**Irina A. Starostsina** (lead editor)

**Aleksei V. Byeli** – Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Pyotr A. Vityaz** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**Andrei Ya. Grigoriev** – V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences  
of Belarus, Gomel, Belarus

**Vitali G. Zalesski** – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,  
Belarus

**Aliaksandr Ph. Ilyshchanka** – State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy – Academician  
O. V. Roman Institute of Powder Metallurgy, Minsk, Belarus

**Sergei M. Kostromitsky** – Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,  
Belarus

**Leonid G. Krasnevski** – Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences  
of Belarus, Minsk, Belarus

**Alexander P. Kren** – Institute of Applied Physics of National Academy of Science of Belarus, Minsk,  
Belarus

**Alexander M. Malyarevich** – Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Nikolai K. Myshkin** – V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences  
of Belarus, Gomel, Belarus

**Oleg G. Penyazkov** – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Valeri M. Fedosyuk** – Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Mikhail L. Kheifetz** – Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

E d i t o r i a l C o u n c i l

**Stephan Vodenicharov** – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria  
**Jozef Gawlik** – Institute for Manufacturing Engineering and Automation of Cracow University of Technology, Poland  
**Gintautas Žintelis** – Lithuanian Academy of Sciences, Vilnius, Lithuania  
**Branko Katalinic** – TU Wien, Wien, Austria  
**Aleksandr A. Mikhalevich** – Institute of Power of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Anton G. Naumovets** – National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine  
**Konstantsin A. Solntsev** – A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
**Lyubodrag Tanovich** – University of Belgrade, Belgrade, Serbia  
**Boris M. Khrustal'ov** – Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Address of the Editorial Office:  
1, Akademicheskaya Str., room 118, 220072, Minsk, Republic of Belarus.  
Tel.: +375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru  
vestift.belnauka.by*

---

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Physical-technical series, 2020, vol. 65, no. 4

*Printed in Russian, Belarusian and English languages*

---

Editor *I. A. Starostina*  
Computer imposition *A. V. Novik*

It is sent of the press 22.12.2020. Appearance 29.12.2020. Format 60×84 1/8. Offset paper. The press digital.

Printed pages 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 70 copies. Order 218.

Number price: individual subscription – 12,32 byn., departmental subscription – 29,31 byn.

Publisher and printing execution:

Republican unitary enterprise "Publishing House "Belaruskaya Navuka"

Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions No. 1/18 dated August 2, 2013. License for the press No. 02330/455 dated December 30, 2013. Address: 40, F. Scorina Str., Minsk, 220141, Republic of Belarus.

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>80 лет Отделению физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси</b> .....	391
<b>МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ</b>	
<b>Акулович Л. М., Миранович А. В., Дечко М. М.</b> Оптимизация технологических факторов магнитно-электрического упрочнения .....	404
<b>Петрова-Буркина О. А., Рубаник В. В. мл., Рубаник В. В., Гамзелева Т. В.</b> Влияние термообработки на величину термокинетической ЭДС при обратном фазовом переходе в никелиде титана ( <i>к 45-летию Института технической акустики Национальной академии наук Беларуси</i> ) .....	413
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА</b>	
<b>Базров Б. М., Хейфец М. Л., Гуревич В. Л., Попок Н. Н.</b> Оценка производственной технологичности конструкции в жизненном цикле изделия ( <i>на английском языке</i> ) .....	422
<b>Кожевникова Г. В., Абрамов А. А., Климов К. А.</b> Прогнозирование структуры металла в процессах попеременно-клиновой прокатки .....	433
<b>Громыко П. Н., Хатетовский С. Н., Трусов И. В.</b> Влияние профиля зубьев на погрешность вращения сателлита передач эксцентрикового типа .....	445
<b>Сотник Л. Л., Русан С. И., Сиваченко Л. А., Наливко О. И.</b> Метод приближенного анализа взаимодействия материала с валками в вибривальковом измельчителе .....	453
<b>ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН</b>	
<b>Ольшанский А. И., Климентьев А. Л.</b> Кинетика теплообмена и метод расчета длительности конвективной сушки натуральной кожи .....	464
<b>Кицак А. И.</b> Эффективность тушения пожара огнетушащим порошком общего назначения при нестационарном взаимодействии его частиц с горящим веществом .....	476
<b>РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ</b>	
<b>Мацулевич О. В., Крень А. П., Протасеня Т. А., Делендик М. Н.</b> Оценка погрешности косвенных измерений физико-механических характеристик материалов методом динамического индентирования .....	487
<b>ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ</b>	
<b>Сорокин В. В.</b> Расчет характеристик пассивного каталитического рекомбинатора водорода в условиях аварии на АЭС-2006 .....	496
<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ</b>	
<b>Соловьев В. И., Рыбальский О. В., Журавель В. В., Железняк В. К.</b> Применение нейронных сетей глубокого обучения для выявления монтажа цифровых фонограмм .....	506

**CONTENTS**

<b>80 years of the Department of Physical and Technical Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus</b> .....	391
<b>MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY</b>	
<b>Akulovich L.M., Miranovich A.V., Dechko M.M.</b> Optimization of technological factors of magnetic-electric strengthening .....	404
<b>Petrova-Burkina O.A., Rubanik V.V., Jr., Rubanik V.V., Gamzeleva T.V.</b> Influence of heat treatment on thermokinetic EMF during reverse phase transition in titanium nickelide ( <i>to the 45th Anniversary of the Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus</i> ) .....	413
<b>MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS</b>	
<b>Bazrov B.M., Kheifetz M.L., Gurevich V.L., Popok N.N.</b> Assessment production manufacturability of the design in the product life cycle .....	422
<b>Kozhevnikova G.V., Abramov A.A., Klimov K.A.</b> Metal structure prediction in cross-wedge rolling processes ..	433
<b>Gromyko P.N., Khatetovsky S.N., Trusov I.V.</b> Influence of tooth profile on rotation error of eccentric gearing satellite .....	445
<b>Sotnik L.L., Rusan S.I., Sivachenko L.A., Naliuko O.I.</b> Method for approximate analysis of interaction of material with rolls in a vibroroll grinder .....	453
<b>POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER</b>	
<b>Ol'shanskii A.I., Klimentyev A.L.</b> Kinetics of heat and moisture exchange and method for calculating the duration of the convective drying process of natural leather .....	464
<b>Kitsak A.I.</b> Efficiency of fire extinguishing with general purpose fire extinguishing powder in case of non-stationary interaction of its particles with burning material .....	476
<b>RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING</b>	
<b>Matsulevich O.V., Kren A.P., Pratasenia T.A., Delendik M.N.</b> Evaluation of the error of indirect measurements of physical-mechanical characteristics of materials by dynamic indentation method .....	487
<b>DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS</b>	
<b>Sorokin V.V.</b> Passive autocatalytic recombiner characteristics calculation during severe accident on AES-2006 NPP .....	496
<b>INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS</b>	
<b>Solovyov V.I., Rybalskiy O.V., Zhuravel V.V., Zheleznyak V.K.</b> Application of neuron networks of deep learning for exposures editing of digital phonograms .....	506

Л. Л. Сотник<sup>1</sup>, С. И. Русан<sup>1</sup>, Л. А. Сиваченко<sup>2</sup>, О. И. Наливко<sup>1</sup><sup>1</sup>Барановичский государственный университет, Барановичи, Брестская область, Республика Беларусь<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет, Могилев, Республика Беларусь**МЕТОД ПРИБЛИЖЕННОГО АНАЛИЗА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАТЕРИАЛА С ВАЛКАМИ В ВИБРОВАЛКОВОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ**

**Аннотация.** Представлены результаты исследования процесса измельчения материала в валковых агрегатах с различными кинематическими особенностями. В качестве объекта исследования выбрана конструкция вибровалкового агрегата, имеющего большие перспективы использования в производстве. Характерной особенностью такого агрегата является значительное влияние на процесс измельчения сил инерции. В качестве основного метода исследования принят метод моделирования, причем применительно к движению рабочих органов валкового и вибровалкового измельчителя и измельчаемого материала. Представлен приближенный анализ взаимодействия измельчаемого материала в валковых агрегатах с валками. Измельчаемый материал моделируется совокупностью горизонтальных элементарных слоев. На первом этапе представлено измельчение материала в валках с постоянными кинематическими параметрами. Установлены аналитические зависимости давления валков на материал. На втором этапе рассмотрено измельчение материалов в вибровалковом измельчителе. Отличительной особенностью вибровалкового измельчителя является наличие эксцентрично установленного вала. Представлен вариант, когда эксцентрик выполняет криволинейно-поступательное движение, а валок совершает гармонические колебания (вибрации) вдоль осей координат с амплитудой  $e$ . Рассмотрены возникающие при этом силы инерции и колебательные движения вала. Проведен анализ суммарного усилия в рассматриваемом агрегате, позволяющем реализовать раздавливающе-сдвиговое и вибрационное воздействия на измельчаемый материал. Силовое взаимодействие вала с материалом описано двумя системами сил: силами упругости, возникающими в результате сокращения модельных слоев согласно закону Гука, и силами, вызванными вибрацией вала (силами инерции). Полученные результаты имеют практическую значимость при проектировании валковых агрегатов и вибрационной техники, а также для анализа работы подобных конструкций измельчителей.

**Ключевые слова:** деформации, усилие, сопротивление, вибровалковый измельчитель, эксцентриковый валок, вибрации

**Для цитирования:** Метод приближенного анализа взаимодействия материала с валками в вибровалковом измельчителе / Л. Л. Сотник [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №4. – С. 453–463. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-453-463>

Leonid L. Sotnik<sup>1</sup>, Sergey I. Rusan<sup>1</sup>, Leonid A. Sivachenko<sup>2</sup>, Oleg I. Nalivko<sup>1</sup><sup>1</sup>Baranovich State University, Baranovich, Brest Region, Republic of Belarus<sup>2</sup>Belarussian-Russian University, Mogilev, Republic of Belarus**METHOD FOR APPROXIMATE ANALYSIS OF INTERACTION OF MATERIAL WITH ROLLS IN A VIBROROLL GRINDER**

**Abstract.** The article presents the results of a study of the process of material grinding in roller aggregates with various kinematic features. As the object of research, the design of a vibroroller unit is selected, which has great prospects for use in production. A characteristic feature of this unit is a significant influence on the grinding process of inertia forces. As the main method of research in relation to the movement of the working bodies of the roller and vibroroller shredder and the crushed material, a method of modeling is adopted. It is presented an approximate analysis of the interaction of the crushed material in roll units with rolls. The crushed material is modeled by a set of horizontal elementary layers. At the first stage, the material is crushed in rolls with constant kinematic parameters. Analytical dependencies of the roll pressure on the material are established. At the second stage, the grinding of materials in a vibroroller shredder is considered. A distinctive feature of the vibroroller shredder is the presence of an eccentrically installed roll. The variant is presented when the eccentric performs a curvilinear translational motion, and the roll performs harmonic fluctuation (vibrations) along the coordinate axes with an amplitude of  $e$ . The resulting inertia forces and oscillatory motions of the roll are considered. The analysis of the total force in the unit under consideration, which makes it possible to implement crushing-shear and vibration effects on the crushed material, is carried out. The force interaction of the roll with the material is described by two systems of forces: the elastic forces resulting from the contraction of the model layers according to Hooke's law, and the forces caused by the vibration of the roll (inertia forces). The results obtained are of practical importance in the design of roller units and vibration equipment, as well as for the analysis of the operation of such designs of grinders.

**Keywords:** deformation, force, resistance, vibratory shredder, eccentric roll, vibration

**For citation:** Sotnik L. L., Rusan S. I., Sivachenko L. A., Nalivko O. I. Method for approximate analysis of interaction of material with rolls in a vibroroll grinder. *Vestsi Natsyunal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 453–463 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-453-463>

**Введение.** Измельчению подвергаются материалы, имеющие различные прочность, твердость и абразивность. Процесс разделения исходного куска материала на отдельные части происходит, когда внешние механические силы превышают внутренние силы молекулярного взаимодействия. Вместе с тем при измельчении образуются новые поверхности [1].

Согласно имеющимся в литературе данным [2–8], реальная прочность измельчаемых материалов на несколько порядков ниже теоретической прочности. Поверхностные слои материала являются потенциально возможными местами зарождения трещин.

Одной из важнейших характеристик, определяющих эффективность работы вибровалкового измельчителя, является сила воздействия валков на измельчаемый материал. Необходимая для измельчения сила влияет на энергозатраты процесса и зависит от многих параметров.

Для того чтобы разрушить тело, его необходимо деформировать на такую величину, при которой в материале возникнет разрушающее напряжение. В вибровалковом измельчителе в материале возникают раздавливающе-сдвиговые и вибрационные (ударные) деформации. Цель исследования заключается в создании математической модели, позволяющей описать механизм разрушения материалов в вибровалковом измельчителе и получить уравнение для расчета усилия измельчения.

**Методика проведения исследования.** Процессам точного проектирования таких агрегатов с определением их технологической эффективности, прочности, необходимой мощности двигателей предшествует приближенный анализ силового взаимодействия измельчаемого материала с валками. Приближенный расчет в дальнейшем может быть уточнен.

На рис. 1 схематично показан простой вариант валков, горизонтальные оси вращения которых  $O_1, O_2$  совмещены с их геометрическими осями симметрии. Материал, подлежащий переработке, находится в бункере (на рисунке не показан) над валками 1, 2. Валки вращаются в противоположные стороны с угловыми скоростями  $\omega_1, \omega_2$ . Измельчаемый материал под действием силы тяжести и силы сцепления с валками перемещается в пространство между валками, которое сужается к минимальной ширине  $b$ .

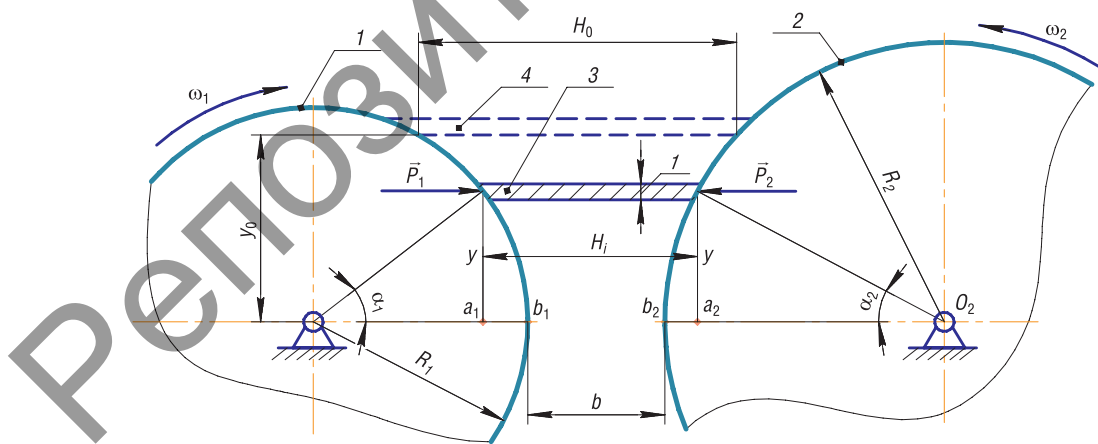


Рис. 1. Модель для анализа взаимодействия осесимметричных валков с материалом

Fig. 1. A model for analyzing the interaction of axisymmetric rolls with material

#### **Определение сил взаимодействия материала с валками в симметричных агрегатах.**

Для изучения сил взаимодействия выделим двумя горизонтальными плоскостями в пространстве между валками слой материала единичной толщины (см. рис. 1) на расстоянии  $y$  от осевой линии  $O_1O_2$ . Поперечный размер слоя обозначим  $H_i$ . Будем учитывать, что величина  $H_i$  является функцией координаты  $y$ :  $H_i = H_i(y)$ . Продольный размер слоя  $B'$  примерно равен длине валков. Разделим слой в продольном направлении на  $B$  частей.

Одну из них размера  $H_i \times 1 \times 1$  будем дальше условно рассматривать как сжатый упругий элементарный слой 3, деформации которого подчиняются закону Гука.

Введем ряд условий:

элементарный слой представляет собой пространство, заполненное измельчаемым материалом; содержащийся в слое материал нестабилен – может перемещаться вдоль и поперек своей оси; материал может работать только на сжатие.

На слой материала со стороны валков действуют силы, осевые составляющие которых обозначим через  $P_1, P_2$ . Из условия равновесия элементарного слоя  $\Sigma X_i = 0$  устанавливаем:  $P_1 = P_2 = P(y) = P$ . Будем считать, что сила тяжести содержащегося над слоем материала и сила его сцепления с валками не влияют на величину силы продольного сжатия  $P$ , а только продвигают слой материала вниз. Часть пространства между валками, в границах которого элементарный слой подвергается деформации и разрушению, будем называть активной зоной. На рис. 1 активная зона сверху ограничена слоем 4 длиной  $H_0$  (показан пунктиром), снизу – отрезком  $b$  осевой линии  $O_1O_2$ .

Найдем длину  $H_i$  элементарного слоя в его произвольном положении 3. Согласно рис. 1,

$$H_i = H_i(y) = a_1 a_2 = b_1 b_2 + a_1 b_1 + a_2 b_2 = b + R_1 + R_2 - \left( \sqrt{R_1^2 - y^2} + \sqrt{R_2^2 - y^2} \right).$$

Далее для упрощения везде будем полагать, что  $R_1 = R_2 = R$ . Тогда получим

$$H_i = b + 2 \left( R - \sqrt{R^2 - y^2} \right). \tag{1}$$

Деформация слоя равна

$$\Delta H = H_0 - \left( b + 2 \left( R - \sqrt{R^2 - y^2} \right) \right). \tag{2}$$

Согласно закону Гука  $\Delta H = p H_0 / c$ , откуда  $p = c \Delta H / H_0$ , и с учетом выражений (1), (2) определяем

$$p = \frac{c \left[ H_0 - b - 2 \left( R - \sqrt{R^2 - y^2} \right) \right]}{\left[ b + 2 \left( R - \sqrt{R^2 - y^2} \right) \right]}.$$

Представим полученный результат в следующем виде:

$$p = c \left\{ \left[ \frac{H_0}{\left( a - 2 \sqrt{R^2 - y^2} \right)} \right] - 1 \right\}, \tag{3}$$

где  $a = 2R + b = O_1O_2$ ; величины  $p$  и  $c$  измеряются в единицах силы, что приходится на единицу длины валка (Н/м).

По формуле (3) определяется интенсивность нагрузки (давления) на материал со стороны валка 2. Такое же по величине реактивное воздействие испытывает и валок. Приближенный график нагрузки представлен на рис. 2.

Допустим, что при  $y = 0$  интенсивность нагрузки  $p$  достигает разрушительно значения  $P_p$ . Тогда выражение (3) позволяет найти соответствующую величину жесткости  $c$ . В действительности, при  $y = 0$  по формуле  $P_p = c((H_0/b) - 1)$ , откуда  $c = P_p / ((H_0/b) - 1)$ .

Находим равнодействующую  $P$  распределенной нагрузки  $p$  в пределах активной зоны:

$$P = \int_0^{y_0} P p dy,$$

или

$$P = c B \int_0^{y_0} \left\{ \left[ \frac{H_0}{\left( a - 2 \sqrt{R^2 - y^2} \right)} \right] - 1 \right\} dy. \tag{4}$$

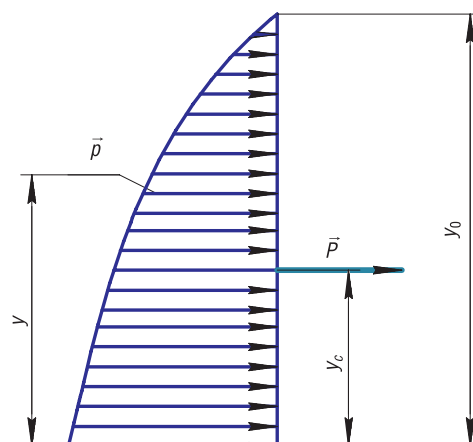


Рис. 2. Приближенный график давления на материал  
Fig. 2. An approximate graph of material pressure

Определим сначала интеграл от первой составляющей вычитания в выражении (4), что в квадратных скобках. Для этого используем подстановку  $y = R \sin t$ . Получаем

$$\int_0^{y_0} \left[ \frac{H_0}{(a - 2\sqrt{R^2 - y^2})} \right] dy = H_0 \int_0^{y_0} \frac{d(R \sin t)}{a - 2\sqrt{R^2 - R^2 \sin^2 t}} = H_0 \int_0^{y_0} \frac{R \cos t dt}{a - 2R \cos t} =$$

$$= -\frac{H_0}{2} \int_0^{y_0} \frac{(-2R \cos t) dt}{a - 2R \cos t} = -\frac{H_0}{2} \int_0^{y_0} \frac{(a - 2R \cos t - a) dt}{a - 2R \cos t} = \frac{H_0}{2} \int_0^{y_0} \left( \frac{a}{a - 2R \cos t} - 1 \right) dt. \quad (5)$$

Найдем интеграл от первого составляющего выражения (5). Применив универсальную подстановку  $\operatorname{tg} t/2 = t$ , которой соответствуют зависимости

$$\sin t = \frac{2\tau}{1 + \tau^2}, \quad \cos t = \frac{1 - \tau^2}{1 + \tau^2}, \quad dt = \frac{2d\tau}{1 + \tau^2}, \quad (6)$$

получаем

$$\int \frac{adt}{a - 2R \cos t} = \int \frac{2ad\tau / (1 + \tau^2)}{a - 2R(1 - \tau^2) / (1 + \tau^2)} = 2a \int \frac{d\tau}{a(1 + \tau^2) - 2R(1 - \tau^2)} = 2a \int \frac{d\tau}{b + k\tau^2} = \frac{2a}{k} \int \frac{d\tau}{(b/k) + \tau^2} =$$

$$= \frac{2a}{k} \int \frac{d\tau}{(\sqrt{b/k})^2 + \tau^2} = \frac{2a}{k\sqrt{b/k}} \operatorname{arctg} \left( \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{b}} \tau \right) = \frac{2a}{\sqrt{kb}} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{k}{b}} \tau \right), \quad (7)$$

где  $k = 4R + b$ .

Находим интеграл от второго составляющего выражения (5):

$$\int dt = \int \frac{d\tau}{1 + \tau^2} = 2 \operatorname{arctg} \tau. \quad (8)$$

Подставляя выражения (7) и (8) в выражение (5), получаем:

$$\int \left[ \frac{H_0}{(a - 2\sqrt{R^2 - y^2})} \right] dy = \frac{aH_0}{\sqrt{kb}} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{k}{b}} \tau \right) - H_0 \operatorname{arctg} \tau. \quad (9)$$

В правой части равенства (9) возвращаемся к переменной  $y$ . В выражениях (5) и (8) использовались формулы:  $\sin t = 2\tau/(1 + \tau^2)$  и  $\sin t = y/R$ ; поэтому  $2\tau/(1 + \tau^2) = y/R$ . Следовательно  $(y/R)\tau^2 - 2\tau + y/R = 0$ .

Корни полученного квадратного уравнения приводятся к виду

$$\tau_{1,2} = \left( R \pm \sqrt{R^2 - y^2} \right) / y. \quad (10)$$

Здесь оба корня  $\tau_1, \tau_2$  положительные. Примем тот из них, при котором сила по выражению (4) принимает большее значение. Будем считать, что таким корнем является корень  $\tau_1 = \left( R + \sqrt{R^2 - y^2} \right) / y$ .

Подставляя выражение (9) в выражение (4) и присоединяя второй интеграл, получаем:

$$\int dy = y.$$

$$P = cB \left\{ H_0 \left[ \frac{a}{\sqrt{kb}} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{k}{b}} \tau_1 \right) - \operatorname{arctg} \tau_1 \right] - y \right\} \Big|_0^{y_0}. \quad (11)$$

Подставляя в выражение (11) пределы интегрирования, будем учитывать, что при  $y = 0$ ,  $\tau_1 = 2R/0 = \infty$ ,  $\operatorname{arctg} \infty = \pi/2$ .

Тогда согласно выражению (11) находим

$$P = cB \left\{ H_0 \left[ a' \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{k}{b}} \tau'_1 \right) - \operatorname{arctg} \tau'_1 - (a' - 1) \frac{\pi}{2} \right] - y_0 \right\}, \quad (12)$$

где  $a' = \frac{a}{\sqrt{kb}}$ ,  $\tau'_1 = \frac{(R + \sqrt{R^2 - y_0^2})}{y_0}$ .

Чтобы определить положение линии действия силы  $P$ , то есть координату  $y_c$  (см. рис. 2), необходимо сначала найти статический момент  $S$  нагрузки  $p$  относительно оси валка  $O_2$  по формуле

$$S = \int_0^{y_0} p y dy.$$

С учетом выражения (3) получаем

$$S = c \int_0^{y_0} \left\{ \left[ \frac{H_0 y}{(a - 2\sqrt{R^2 - y^2})} \right] - y \right\} dy. \quad (13)$$

Преобразуем первое слагающее под интегралом; при  $y = R \sin t dt$  находим:

$$\frac{y dy}{a - 2\sqrt{R^2 - y^2}} = \frac{(R \sin t)(R \cos t dt)}{a - 2R \cos t} = \frac{R^2 \cos t \sin t dt}{a - 2R \cos t}$$

Введем новую подстановку  $\cos t = \tau$ , тогда  $\sin t dt = -d\tau$ .

Следовательно, первое слагающее выражения (13) приобретает вид

$$\frac{y dy}{a - 2\sqrt{R^2 - y^2}} = \frac{R^2 (-\tau) d\tau}{a - 2R\tau} = \frac{R^2 (a - 2R\tau - a) d\tau}{2R(a - 2R\tau)} = \frac{R}{2} \left( 1 - \frac{a}{a - 2R\tau} \right) d\tau.$$

Выполняем интегрирование полученного выражения. Поскольку здесь

$$\int d\tau = \tau, \quad \int \frac{a d\tau}{a - 2R\tau} = -\frac{a}{2R} \ln(a - 2R\tau),$$

то

$$\int \frac{y dy}{a - 2\sqrt{R^2 - y^2}} = \frac{R \left\{ \tau + \left[ a \ln(a - 2R\tau) \right] / 2R \right\}}{2}. \quad (14)$$

Возвращаемся к правой части равенства (14): сначала к переменной  $t$ , затем – к  $y$ ; при этом учитываем, что  $\sin t = y/R$ :

$$\cos t = \sqrt{1 - (y/R)^2} = \sqrt{R^2 - y^2} / R.$$

Получаем

$$\int \frac{y dy}{a - 2\sqrt{R^2 - y^2}} = \left\{ \sqrt{R^2 - y^2} + a \left[ \ln(a - 2\sqrt{R^2 - y^2}) \right] / 2 \right\} / 2. \quad (15)$$

Подставляем полученное выражение (15) в выражение (13) и присоединяем интеграл  $\int y dy$  второго слагающего (13):

$$S = c \left\{ H_0 \left\{ \sqrt{R^2 - y^2} + a \left[ \ln(a - 2\sqrt{R^2 - y^2}) \right] / 2 \right\} / 2 - y^2 / 2 \right\} \Big|_0^{y_0}.$$

Подставляем пределы  $(0, y_0)$ :

$$S = c \left\{ H_0 \left\{ \frac{x_0 + a \left[ \ln(a - 2x_0) \right] / 2}{2} \right\} - \frac{y_0^2}{2} - c \left\{ \frac{H_0 \left[ R + a \left( \ln b \right) / 2 \right]}{2} \right\} \right\}. \quad (16)$$

Координату  $y_c$  определяем по формуле

$$y_c = S / P. \quad (17)$$

Процесс измельчения материала в рассмотренном агрегате с неизменным межвалковым пространством будем называть стабильным. Разделение фракции происходит без существенных динамических воздействий. Это позволяет для приближенного силового анализа конструкции агрегата использовать уравнения статики.

На рис. 3 представлена система сил, возникающих при взаимодействии валков с измельчаемым материалом. Введем следующие обозначения:  $G_T$  – сила тяжести материала, находящегося в бункере 3 и активном пространстве между валками;  $F_i$  – сила инерции части материала (его масса определяется опытным путем), перемещаемого с ускорением через межвалковое пространство;  $G = G_T - F_i$ ;  $G' = G/2\sin\alpha$  – перпендикулярная к поверхности валка составляющая силы  $G$ , ограничивающей активное пространство;  $G_1, G_2$  – силы тяжести валков;  $X_1, X_2, Y_1, Y_2$  – реакции опор, в которых закреплены оси валков;  $M_1, M_2$  – моменты на валках.

Силой  $F_i$  можно пренебречь.

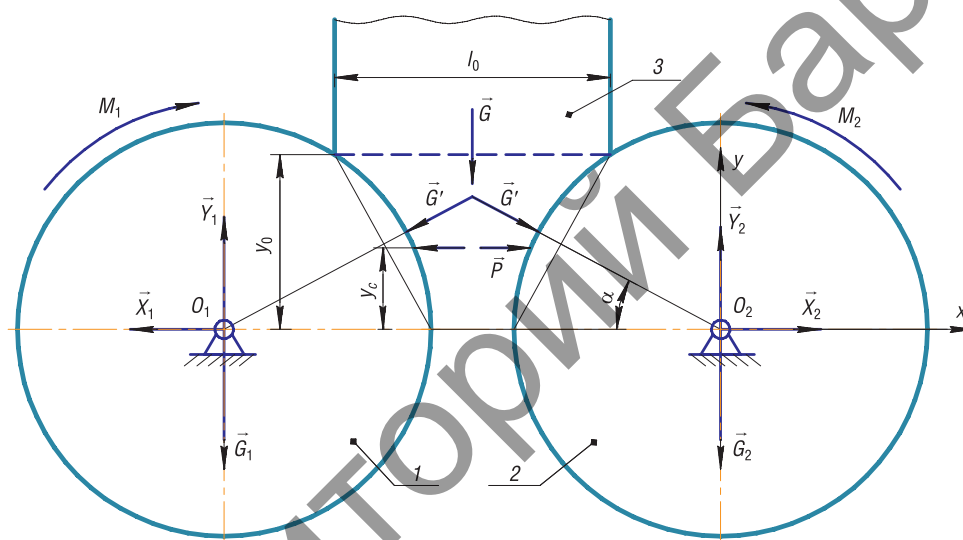


Рис. 3. Схема системы сил  
Fig. 3. Force system diagram

Условия равновесия валка 2 представим следующим образом:

$$P + G' \cos \alpha + X_2 = 0; \quad Y_2 - G' \sin \alpha - G_2 = 0; \quad M_2 - P y_c = 0. \quad (18)$$

Из уравнений (18) находятся неизвестные  $X_2, Y_2$ , и  $M_2$ , необходимые для проектирования опор валков и выбора параметров двигателей.

**Определение сил взаимодействия в вибровалковом измельчителе.** Рассмотрим конструкцию, в которой правый валок 2 выполняет сложное движение (патент РФ № 186478 : В02С 4/32 «Вибровалковый измельчитель-активатор», авторы: В. С. Севостьянов, Л. А. Сиваченко, М. В. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко, Л. Л. Сотник, П. Ю. Горягин; [9–11] ). Его ось симметрии  $CC$  шарнирно закреплена на перекладке эксцентрикового вала, представляющего собой прямоугольную рамку, которая вращается вокруг неподвижной оси  $O_2O_2$  (рис. 4).

Величину сдвига оси валка (его эксцентриситет) обозначаем  $e$ , на рис. 4 этот размер многократно увеличен. Свободно закрепленный на перекладке  $CC$  валок имеет две степени свободы. Поэтому его абсолютный угол поворота  $\varphi_2$  определяется суммой двух углов:  $\varphi_2 = \varphi_{2e} + \varphi_{2r}$ , где  $\varphi_{2e}$  – угол поворота валка вместе с эксцентриковым валом в переносном движении вокруг оси  $O_2O_2$ ;  $\varphi_{2r}$  – его поворот в относительном движении вокруг подвижной оси  $CC$ . Соответствующие угловые скорости эксцентрика обозначим  $\omega_{2e}, \omega_{2r}$ . При отсутствии дополнительного привода к валку 2 величина  $\omega_{2r}$  неопределенная.

Остановимся далее на варианте, при котором  $\omega_{2r} = -\omega_{2e}$ ; эксцентрик в этом случае выполняет криволинейно-поступательное движение. Каждая его точка описывает окружность радиусом  $e$ . Весь валок совершает гармонические колебания (вибрации) вдоль осей координат с амплитудой  $e$ . Измельчаемый материал будем, как и прежде, моделировать совокупностью горизонтальных элементарных слоев. Поэтому далее нас будут интересовать только горизонтальные вибрации эксцентрика, способные сжимать слои. Если исходное положение эксцентрика во введенной системе координат принять согласно рис. 5, то его уравнение движения вдоль оси  $O_2x$  определяется по формуле

$$x = e \sin \varphi_e, \tag{19}$$

где  $\varphi_e = \omega t$ ,  $\omega = \omega_{2e}$ .

Упрощенная модель поступательных колебаний (19) эксцентрика показана на рис. 6.

В процессе колебаний валок из положения 2 перемещается на расстояние  $e$  в крайнее левое положение 2', затем – в крайнее правое 2''. Перемещение эксцентрика из положения 2'' в 2', в ходе которого материал сжимается и разрушается, представляет собой его рабочий ход. Обратное перемещение валка из положения 2' в 2'' назовем холостым ходом. Заметим, что во время холостого хода силовое напряжение слоев уменьшается. В верхней части активного пространства оно может изменяться до нулевого значения с потерей контакта между валком и материалом. Восстанавливаться контакт будет при рабочем ходе с эффектом удара, который требует дополнительного исследования.

Силовое взаимодействие валка с материалом будем описывать двумя системами сил: силами упругости, возникающими в результате сокращения модельных слоев согласно закону Гука, и силами, вызванными вибрацией валка (силами инерции). Причины сокращений слоев две: продвижение материала в активном пространстве между валками и перемещение эксцентрикового валка влево из положения 2 в 2' (см. рис. 6), на расстояние  $e$ . Силовые взаимодействия для первого варианта описаны выражениями (12), (16) и (17). При этом в вибровалковом измельчителе с эксцентриковым правым валком активное пространство ограничивается справа поверхностью валка в положении 2 (см. рис. 6).

При вычислении сил упругости, соответствующих деформации  $\Delta H = e$ , приближенно считаем процесс нагружения слоя статическим. Тогда в соответствии с законом Гука для каждого слоя длиной  $H_i$  получим:  $p'H_i/c = e$ , где  $p'$  – элементарная сила взаимодействия валка с материалом. Равнодействующую силу  $P'$ , приложенную к материалу, определим по формуле

$$P' = ceB \int_0^{y_0} dy / H_i.$$

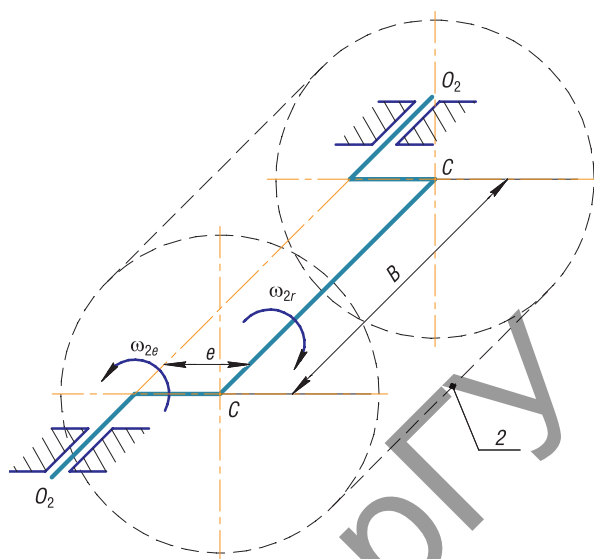


Рис. 4. Схема эксцентрикового валка  
Fig. 4. Eccentric roll scheme

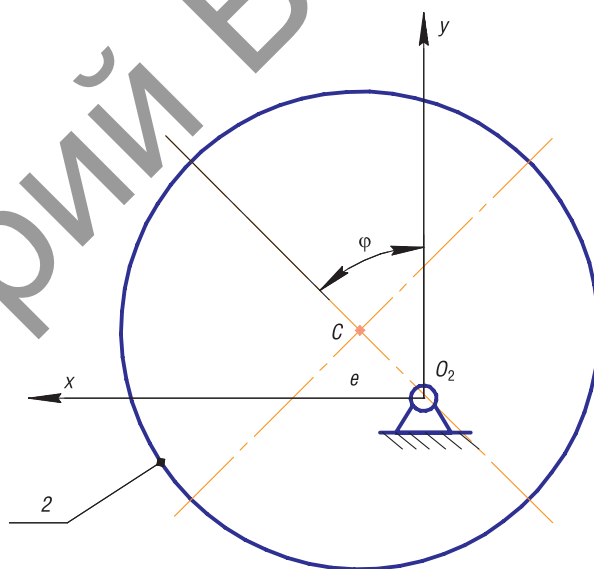


Рис. 5. Исходное положение эксцентрикового валка  
Fig. 5. Starting position of the eccentric roll



максимальную силу инерции, которая имеет место при максимальном ускорении материала и эксцентрика,

$$a = \ddot{x} = -e\omega^2 \sin \omega t,$$

где при  $\omega t = \pi/2$  получаем

$$|a| = |a_{\max}| = e\omega^2.$$

Следовательно, максимальное ускорение  $a_{\max}$  возникает для эксцентрика в положении 2'. Массу слоя для этого положения будем представлять двумя материальными точками с массами  $m_e = (m_H/H_i)e$  и  $m_{H'} = (m_H/H_i)H'$ , где  $m_e$  и  $m_{H'}$  – массы участков слоя материала длиной  $e$  и  $H'$  соответственно; при этом  $e + H' = H_i$ .

Первая материальная точка соприкасается с валком и в его положении 2' достигает значения  $a_{\max}$ . Массу участка  $H'$  считаем равномерно распределенной по его длине, тогда его центр масс находится посередине отрезка  $H'$ . Также допускаем, что ускорение материала в пределах этого отрезка угасает по линейному закону от  $a_{\max}$  к 0 (см. рис. 7). Тогда центру масс участка  $H'$  – второй материальной точке – будет соответствовать ускорение  $a_{\max}/2$ .

Таким образом, расчетная (максимальная) сила инерции, действующая на элементарный слой, определяется выражением

$$f_i = m_e a_{\max} + m_{H'} a_{\max} / 2.$$

Подставив сюда значения слагаемых, получаем

$$f_i = m_H (e + H' / 2) a_{\max} / H_i = m_H [e + (H_i - e) / 2] a_{\max} / H_i = m_H (1 - e / H_i) a_{\max} / 2,$$

или сокращенно  $f_i = (1 + e / H_i) f_{ci}$ , где  $f_{ci} = m_H a_{\max} / 2 = \text{const}$ .

Равнодействующую  $F_i$  элементарных сил инерции для всего активного пространства определим по формуле

$$F_i = \int_0^{y_0} B f_i dy,$$

или

$$F_i = f_{ci} B \int_0^{y_0} \left[ 1 + \frac{e}{(a - 2\sqrt{R^2 - y^2})} \right] dy. \quad (22)$$

Для определения статического момента сил инерции, приведенных к одной плоскости относительно центра  $O_2$ , используется выражение

$$S_i = f_{ci} B \int_0^{y_0} \left[ y + \frac{ey}{(a - 2\sqrt{R^2 - y^2})} \right] dy. \quad (23)$$

Повторив в выражениях (22), (23) методику интегрирования, используемую ранее для выражений (4), (13), получим

$$F_i = f_{ci} B \left\{ e \left[ a' \arctg \left( \sqrt{\frac{k}{b}} \tau'_1 \right) - \arctg \tau'_1 - (a' - 1) \frac{\pi}{2} \right] + y_0 \right\}, \quad (24)$$

$$S_i = f_{ci} B \left\{ \frac{e}{2} \left[ x_0 + \frac{a}{2} [\ln(a - 2x_0)] \right] + \frac{y_0^2}{2} \right\} - f_{ci} B \left\{ \frac{e}{2} \left[ R + \frac{a}{2} (\ln b) \right] \right\}. \quad (25)$$

В выражениях (24), (25) сохранены обозначения, введенные ранее в выражениях (12), (16). Положение линии действия силы  $F_i$  находим, как и выше, по формуле  $y_c = S_i/F_i$ .

Как видим, расчетные значения трех силовых факторов имеют место в одной фазе движения эксцентрика, поэтому их воздействия на материал и эксцентрик суммируются. При этом расчетная схема вибровалкового измельчителя (см. рис. 3) дополняется силами  $P'$  и  $F_i$ .

Здесь представлено силовое взаимодействие в механической системе для случая, когда  $\omega_{2r} = -\omega_{2e}$ ; другое соотношение между угловыми скоростями в приближенной теории на результат не влияет.

**Заключение.** Разработан метод приближенного анализа взаимодействия материала с валками в вибровалковом измельчителе, основанный на использовании нелинейной зависимости между силами и деформациями.

Полученная в работе математическая модель позволяет описать механизм разрушения материалов в вибровалковом измельчителе. Аналитические зависимости для расчета усилия измельчения могут использоваться с различной эффективностью в зависимости от механических и структурных характеристик измельчаемого материала, а также от геометрических  $e$ ,  $b$ ,  $R$ , кинематических параметров  $\omega$  и других факторов.

Полученные выражения для расчета усилия измельчения с созданием раздавливающе-сдвиговых и вибрационных (ударных) деформаций могут использоваться при практической реализации представленного метода измельчения материалов.

### Список использованных источников

1. Дешко, Ю.И. Измельчение материалов в цементной промышленности / Ю.И. Дешко, М.Б. Креймер, Г.С. Крыхтин. – М.: Стройиздат, 1966. – 270 с.
2. Griffiths, A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids / A. A. Griffiths // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. – 1921. – Vol. 221. – P. 163–198.
3. Моргулис, М.Л. Вибрационное измельчение материалов / М.Л. Моргулис. – М.: Промстройиздат, 1957. – 105 с.
4. Ходаков, Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов / Г.С. Ходаков. – М.: Стройиздат, 1972. – 238 с.
5. Справочник по обогащению руд / Ю.Э. Аккерман [и др.]. – М.: Недра, 1982. – 387 с.
6. Колмогоров, В.П. Напряжения, деформации, разрушение / В.П. Колмогоров. – М.: Metallurgia, 1970. – 229 с.
7. Зайцев, Ю.В. Прочность и долговечность конструкционных материалов с трещиной / Ю.В. Зайцев, С.Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2010. – 362 с.
8. Эберхардштайнер, Й. Прочность и трещиностойкость конструкционных строительных материалов при сложном напряженном состоянии / Й. Эберхардштайнер, С.Н. Леонович, Ю.В. Зайцев. – Минск: БНТУ, 2013. – 522 с.
9. 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. Машиностроение*. – 2018. – №4. – С. 19–22.
10. Сотник, Л.Л. Исследования взаимодействия материальной точки с цилиндрическим эксцентриком / Л.Л. Сотник, С.И. Русан, Л.А. Сиваченко // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2019. – №1. – С. 48–54.
11. Сиваченко, Л.А. Кинематический анализ движения эксцентрикового валка вибровалкового измельчителя [Электронный ресурс] / Л.А. Сиваченко, Л.Л. Сотник, С.И. Русан // *Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: Междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 22–23 сент. 2017 г.* / Белгород. ГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
12. Чигарев, А.В. Курс теоретической механики: учеб. пособие / А.В. Чигарев, Ю.В. Чигарев. – Минск: Новое знание; М.: ЦУПД, 2010. – 397 с.
13. Хвясцько, Г.М. Курс тэарэтычнай механікі. – Мінск: БДТУ, 2000. – 354 с.

### References

1. Deshko Yu. I., Kreimer M. B., Krykhtin G. S. *Grinding Materials in the Cement Industry*. Moscow, Stroizdat Publ., 1966. 270 p. (in Russian).
2. Griffiths A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 1921, vol. 221, pp. 163–198.
3. Morgulis M. L. *Vibration Grinding of Materials*. Moscow, Promstroizdat Publ., 1957. 105 p. (in Russian).
4. Khodakov G. S. *Fine Grinding of Building Materials*. Moscow, Stroizdat Publ., 1972. 238 p. (in Russian).
5. Akkerman Yu. E., Bukaty G. B., Kizeval'ter B. V., Kornienko Ya. P., Olevskii V. A., Perov V. A., Povarov A. I., Yashin V. P. *Ore Beneficiation Handbook*. Moscow, Nedra Publ., 1982. 387 p. (in Russian).
6. Kolmogorov V. P. *Stresses, Deformations, Fracture*. Moscow, Metallurgia Publ., 1970. 229 p. (in Russian).
7. Zaitsev Yu. V. *Strength and Durability of Structural Materials with a Crack*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2010. 362 p. (in Russian).
8. Eberhardsteiner, J., Leonovich S. N., Zaitsev Yu. V. *Strength and Crack Resistance of Structural Building Materials under Complex Stress State*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2013. 522 p. (in Russian).
9. Sotnik L. L., Sivachenko L. A., Bogdanovich I. A. Studying the influence of technological factors on the power consumption of a vibratory shredder. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie = Bulletin of the Brest State Technical University. Mechanical Engineering*, 2018, no. 4, pp. 19–22 (in Russian).

10. Sotnik L. L., Rusan S. I., Sivachenko L. A. Studies of the interaction of a material point with a cylindrical eccentric. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 2019, no. 1, pp. 48–54 (in Russian).

11. Sivachenko L. A., Sotnik L. L., Rusan S. I. Kinematic analysis of the movement of an eccentric roll of a vibratory roll mill. *Energo-resursosberegayushchiye tekhnologii i oborudovaniye v dorozhnoy i stroitel'noy otraslyakh: Mezhdunarodnaya nauchnaya prakticheskaya konferentsiya, Belgorod, 22–23 sentyabrya 2017 g.* [Energy and Resource-Saving Technologies and Equipment in the Road and Construction Industries: International Scientific and Practical Conference, Belgorod, September 22–23, 2017]. Belgorod, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2017. CD-ROM (in Russian).

12. Chigarev A. V., Chigarev Yu. V *Theoretical Mechanics Course*. Minsk, Novoe znanie Publ.; Moscow, Center for Educational and Professional Literature, 2010. 397 p. (in Russian).

13. Khvvyako G. M. *Theoretical Mechanics Course*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2000. 354 p. (in Belarusian).

### Информация об авторах

*Сотник Леонид Леонидович* – старший преподаватель кафедры технологии и оборудования машиностроения, руководитель секции технологии машиностроения, Барановичский государственный университет (ул. Войкова, 21, 225404, Барановичи, Брестская обл., Республика Беларусь). E-mail: Sotnikleonidtm@gmail.com

*Русан Сергей Иванович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии, Барановичский государственный университет (ул. Войкова, 21, 225404, Барановичи, Брестская обл., Республика Беларусь). E-mail: rusan33@mail.ru

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

*Наливко Олег Игоревич* – аспирант, Барановичский государственный университет (ул. Войкова, 21, 225404, Барановичи, Брестская обл., Республика Беларусь). E-mail: alehnaliuko@mail.ru

### Information about the authors

*Leonid L. Sotnik* – Senior Lecturer, Department of Engineering Technology and Equipment, Head of the Engineering Technology Section, Baranovichi State University (21, Voikov Str., 225404, Baranovichi, Brest Region, Republic of Belarus). E-mail: Sotnikleonidtm@gmail.com

*Sergey I. Rusan* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Support of Agricultural Production and Agronomy, Baranovichi State University (21, Voikov Str., 225404, Baranovichi, Brest Region, Republic of Belarus). E-mail: ru-san33@mail.ru

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

*Oleg I. Nalivko* – Postgraduate Student, Baranovichi State University (21, Voikov Str., 225404, Baranovichi, Brest Region, Republic of Belarus). E-mail: alehnaliuko@mail.ru

РЕПОЗИТОРИЙ БНТУ