

About the authors

Amelin Vladimir Anatolievich, Master of Science, Principal Specialist in Rock Mechanics Department, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, gips5@ua.fm.

Vojtovich Tatiana Gennadievna, Doctoral Student in the Department in Rock Mechanics Department, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, vojtovich.leonid@yandex.ru.

Amelina Larisa Vladimirovna, Master of Science, assistant, Agrarian University, Dnepropetrovsk, Ukraine, gips5@ua.fm.

Krasovskiy Igor Svyatoslavovich, Master of Science, Engineer in Rock Mechanics Department, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, i.s.krasovskiy@gmail.com.

Анотація. Дослідження роботи прохідницького комбайна АМ-50 в умовах Порецької гіпсової шахти проводилося з метою встановлення можливості ефективного використання комбайнів з робочим органом вибіркової дії при виїмці гіпсу підземним способом, визначення оптимальних режимів роботи, експлуатаційних якостей, надійності та перевірки роботи різального інструменту.

У процесі роботи досліджено кілька варіантів обробки вибою при різній величині зарубки робочого органу. При цьому визначені продуктивність комбайна при різних схемах обробки вибою, питома витрата енергії, гранулометричний склад відбитої гірської маси і витрата різців.

У результаті досліджень встановлено можливість застосування комбайна вибіркової дії при веденні гірничопідготовчих і очисних робіт при розробці Анастасово-Порецького родовища гіпсу й ангідриту.

Отримані результати використовуються для оптимізації технологічних показників гірничодобувних комбайнів при видобутку гіпсу.

Ключові слова: гіпсова шахта, комбайн, механічне відбивання, продуктивність, гранулометричний склад.

Abstract. Operation of the AM-50 heading machine was studied in conditions of the Poretskaya gypsum mine in order to explore a possibility to use combines with working organ of selective action for underground gypsum extracting, determine optimal modes of the combine operation, its functional quality and reliability, and to test operation of the cutting tool.

In the process of the work, several methods of the face mining were investigated at different depths of the working body cutting. With this combine, productivity at different mining schemes, specific power consumption, particle size distribution in the broken rock mass and cutting tools consumption were determined.

Basing on the findings it is stated that combines of selective action can be used for mining and winning operations while developing the Anastasovo-Poretsky fields of gypsum and anhydrite.

The findings are to be used for optimizing technological parameters of the mining combines at the gypsum extraction

Keywords: gypsum mine, combine, mechanical breaking, productivity, particle size distribution.

Статья поступила в редакцию 22.07.2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.П. Минеевым

УДК 622.74.913.1

Ягнюкова И.В., аспирант
(ИГТМ НАН Украины)

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО
ОПРЕДЕЛЕНИЮ СИЛ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ
ОРГАНОВ ВАЛКОВОГО ВИБРАЦИОННОГО КЛАССИФИКАТОРА С
ГОРНОЙ МАССОЙ**

Ягнюкова І.В., аспірант
(ІГТМ НАН України)

**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З
ВИЗНАЧЕННЯ СИЛ УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ
ВАЛКОВОГО ВІБРАЦІЙНОГО КЛАСИФІКАТОРА
З ГІРНИЧОЮ МАСОЮ**

Iagniukova I.V., Doctoral Student
(IGTM NAS of Ukraine)

**THE EXPERIMENTAL RESULTS ON DETERMINING FORCES OF
THE SHOCK INTERACTION BETWEEN EXECUTIVE TOOLS OF THE
VIBRATING ROLLER CLASSIFIER AND THE ROCKS**

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований по определению сил ударного взаимодействия рабочих органов валкового вибрационного классификатора с горной массой. Получены зависимости таких сил ударного взаимодействия звездочной просеивающей поверхности валкового вибрационного классификатора с кусковой горной массой. Силы ударного взаимодействия определены в зависимости от конструктивных параметров звездочек валков, таких как модуль упругости резинового материала звездочки, твердость резинового материала по Шору А, приведенная длина консоли звездочки и количество консольных лепестков звездочки, а также от режимных параметров классификатора, таких как угловая частота вращения звездочек. Экспериментальные исследования позволили сделать вывод, что при выборе определенных варьируемых параметров на просеивающей поверхности валкового вибрационного классификатора в виде звездочек возникают дополнительные силы, способные разрушить внутренние связи слепшейся горной массы. Анализ данных результатов экспериментальных исследований будет представлен в дальнейших работах автора.

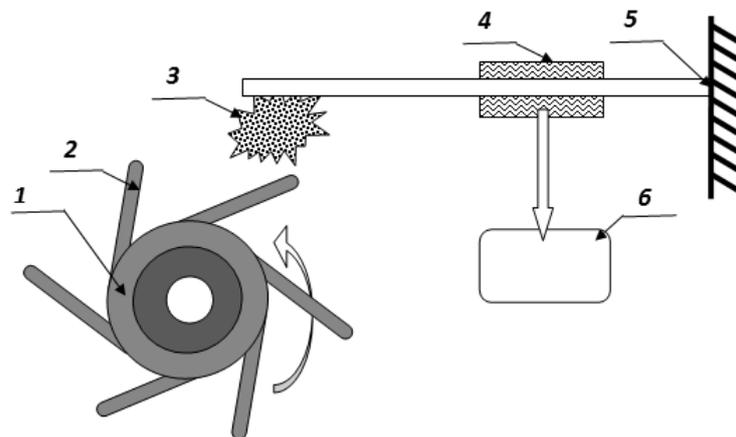
Ключевые слова: силы ударного взаимодействия, звездочная просеивающая поверхность, виброударный режим, валковый вибрационный классификатор, ударные элементы.

Переработка влажной, липкой, волокнистой, агломерированной, склонной к налипанию на рабочие органы горных машин, в частности грохотов, горной массы является актуальной прикладной задачей, так как преодоление сил адгезии между частицами и агломератами трудногрохотимого минерального сырья приводит к значительным экономическим затратам перерабатывающих предприятий.

В данной работе процесс взаимодействия горной массы с рабочим органом

© И.В. Ягнюкова, 2015

грохота представляется как процесс виброударного взаимодействия звездочек валков с кусковой горной массой. Получены зависимости силы виброударных импульсов от модуля упругости материала звездочек, приведенной длины консоли звездочек, массы куска горной массы, круговой частоты вращения звездочек, количества консольных лепестков звездочек. Модель экспериментальной установки представлена на рис. 1.



1 – элемент рабочего органа грохота; 2 – консоль звездочки; 3 – кусок горной массы; 4 – датчик; 5 – узел крепления датчика; 6 – регистратор «Discrete Acoustics Lab»

Рисунок 1 - Экспериментальная установка для определения силы удара

Экспериментальная установка по определению силы ударного взаимодействия работает следующим образом. При вращении звездочек валков 1 (рис.1) с угловой скоростью $\omega_{вр}$ происходит поочередное виброударное взаимодействие консолей звездочек 2 с куском горной массы 3 массой m_0 . В результате этого взаимодействия в тензорезисторном датчике 4, установленном на консоли 5, возникают изгибные напряжения, которые измеряются регистратором 6. Регистратор 6 оцифровывает значения изгибных напряжений возникающих в датчике 4 при взаимодействии консолей звездочек с куском горной массы и осуществляет их перевод в силовые значения ударных импульсов размерностью $[H]$.

В ходе эксперимента было определено и принято, что такие параметры как E - модуль упругости резинового материала звездочки, l_{np} - приведенная длина консоли звездочки, m_0 - масса куска горной массы, $\omega_{вр}$ - круговая частота вращения звездочки, N - количество консольных лепестков звездочки валка вносят существенный вклад в силу виброударного взаимодействия звездочки и куска горной массы, то есть: $F_{y\partial} = f(E, l_{np}, m_0, \omega_{вр}, N)$.

В ходе экспериментов диапазоны варьируемых параметров изменялись в следующих пределах.

1. E - в эксперименте принимал четыре значения: $E_1 = 2,0$; $E_2 = 4,0$; $E_3 = 6,0$; $E_4 = 8,0$ [МПа]. Модуль упругости звездочек, изготовленных из четырех различных резиновых смесей, определяется по формуле [1]

$$E = 3,57 \cdot e^{0,033H},$$

где H - твердость по Шору А, она была определена по ГОСТ 263-63 твердомером для резин ТШМ-2 методом погружения индентора твердомера в образец и измерения его сопротивления вдавливанию, для различных резиновых смесей материала звездочек твердость H равнялась соответственно 46, 60, 81 и 87 единиц. Модуль упругости резины от ее твердости впервые опубликован в работе [2] и представлен на рис.2.

2. l_{np} - приведенная длина консоли звездочки показана на рис.3. Приведенная длина консоли звездочки есть расстояние между A_0 и A_1 , длина от A_0 до точки A_1 в процессе эксперимента принимала пять различных значений: $l_{np1} = 0,01$; $l_{np2} = 0,015$; $l_{np3} = 0,02$; $l_{np4} = 0,03$; $l_{np5} = 0,005$ м.

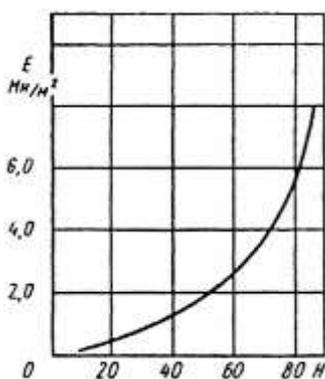


Рисунок 2 - Зависимость модуля упругости от твердости резины

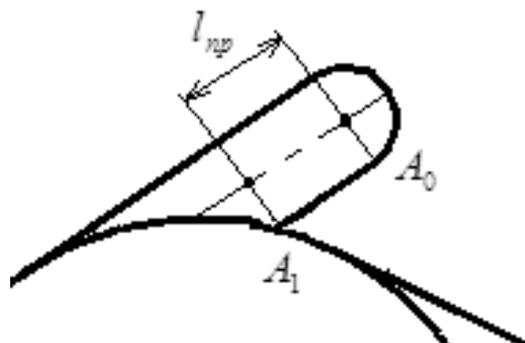


Рисунок 3 - Фрагмент консоли лепестка звездочки

3. m_0 - масса куска горной массы принимала в процессе эксперимента пять значений: $m_{01} = 0,005$; $m_{02} = 0,01$; $m_{03} = 0,02$, $m_{04} = 0,04$; $m_{05} = 0,06$ кг.

4. ω_{ep} - угловая частота вращения звездочек принимала в процессе эксперимента четыре значения: $\omega_{ep1} = 2$; $\omega_{ep2} = 4$; $\omega_{ep3} = 6$; $\omega_{ep4} = 8$ рад/с.

5. N - количество консольных лепестков звездочки валка обусловлено конструктивными особенностями звездочек и в процессе эксперимента принимало значения: $N_1 = 2$; $N_2 = 3$; $N_3 = 6$; $N_4 = 12$ шт.

Общий вид фиксируемых регистратором 6 виброударных импульсов представлен на рис.4.

Фрагменты процесса воздействия звездочки на кусок горной массы на рис.4 представлены в различных масштабах времени и зарегистрированы при $E = 6,0$ МПа, $l_{np} = 0,04$ м, $m_0 = 0,02$ кг, $\omega_{ep} = 8$ рад/с, $N = 6$ шт.

Зарегистрированное ударное взаимодействие представляет собой последовательность повторяющихся, равноотстоящих друг от друга импульсных затухающих колебаний, с добротностью определенной упругими свойствами узла крепления датчика.

Для всех зарегистрированных процессов сила виброударного взаимодействия определялась как среднее пиковое значение всех виброударных импульсов.

сов за весь процесс измерения при конкретных фиксированных, изменяемых по ходу эксперимента пяти параметрах.

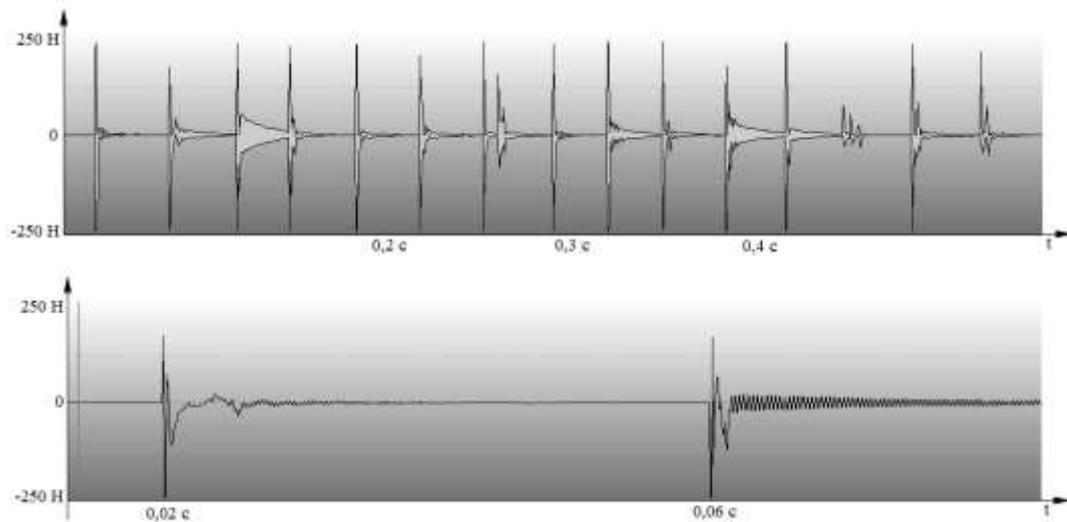


Рисунок 4 – Виброударные импульсы, фиксируемые регистратором

Из рис.4 видно, например, что при фиксированных: $E = 6,0$ МПа, $l_{np} = 0,04$ м, $m_0 = 0,02$ кг, $\omega_{gp} = 4$ рад/с, $N = 6$ шт, пиковые значения силы виброударных импульсов составляют 120 [Н], а их период следования $\tau = 0,04$ с.

Из рис.4 видно также наличие крутых передних фронтов в виброударных импульсах, что говорит о насыщенности спектрального состава зарегистрированных виброударных процессов и свидетельствует о широком диапазоне распределения спектральной плотности энергии колебаний по частоте.

В ходе эксперимента были определены зависимости сил виброударного взаимодействия кусковой горной массы со звездочками валковой просеивающей поверхности от пяти варьируемых параметров валкового вибрационного классификатора.

1. Сила виброударного взаимодействия от модуля упругости резинового материала звездочки валка $F_{y\partial} = f(E)$ определялась при фиксированных (l_i , m_i , N_i) и переменной ω_{gp} (рис.5).

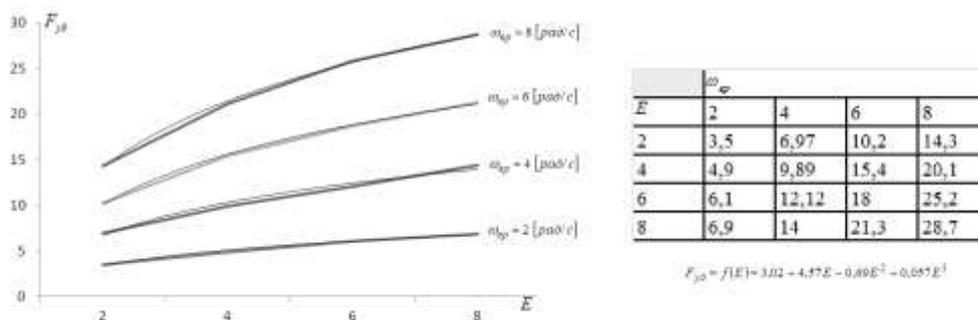


Рисунок 5 - Семейство кривых $F_{y\partial} = f(E)$

2. Затем определялась сила виброударного взаимодействия от приведенной длины консоли звездочки валка $F_{y\partial} = f(l_{np})$ при фиксированных (E , m_i , N_i) и пе-

ременной ω_{ep} (рис.6).

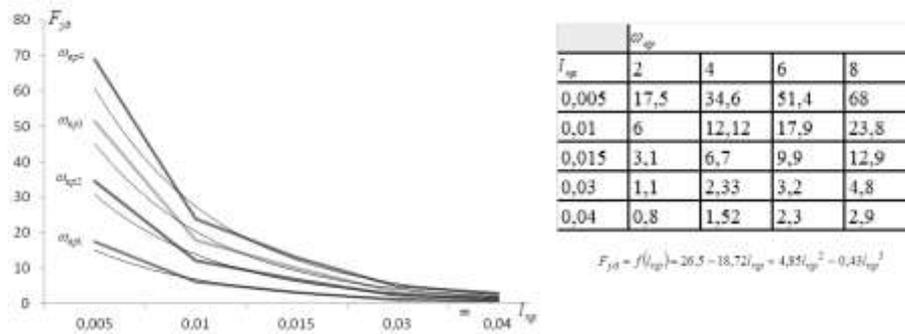


Рисунок 6 - Семейство кривых $F_{y\delta} = f(l_{np})$

3. Сила виброударного взаимодействия вала в зависимости от массы куска горной массы $F_{y\delta} = f(m_0)$ определялась при фиксированных (E, l_i, N_i) и переменной ω_{ep} (рис.7).

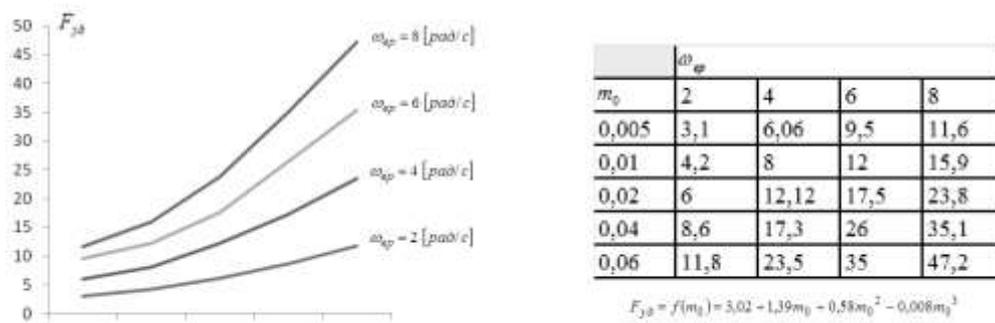


Рисунок 7 - Семейство кривых $F_{y\delta} = f(m_0)$

4. Сила виброударного взаимодействия вала в зависимости от угловой скорости вращения валков $F_{y\delta} = f(\omega)$ определялась при фиксированных (l, m_i, N_i) и различных модулях упругости E материала (рис.8).

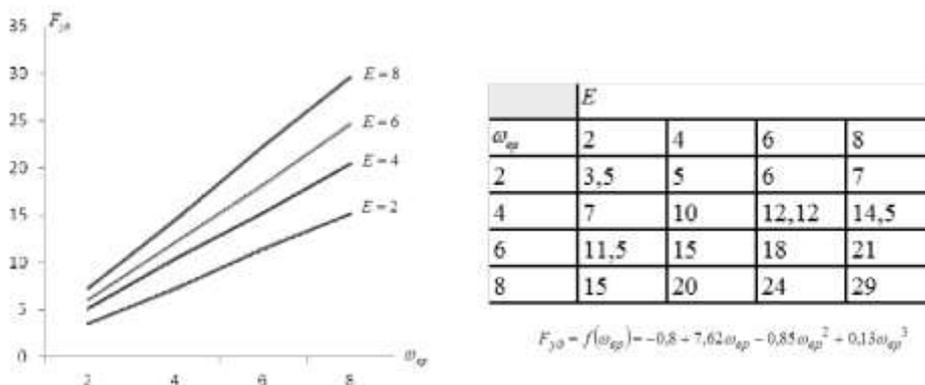


Рисунок 8 – Сила виброударного взаимодействия вала в зависимости от угловой скорости вращения валков $F_{y\delta} = f(\omega_{ep})$

5. Сила виброударного взаимодействия вала в зависимости от количества

консольных лепестков звездочки $F_{y\partial} = f(N)$ определялась при фиксированных (E, l_{np}, m_0) и переменной ω_{ep} . На рис.9 представлено семейство кривых $F_{y\partial} = f(N)$.

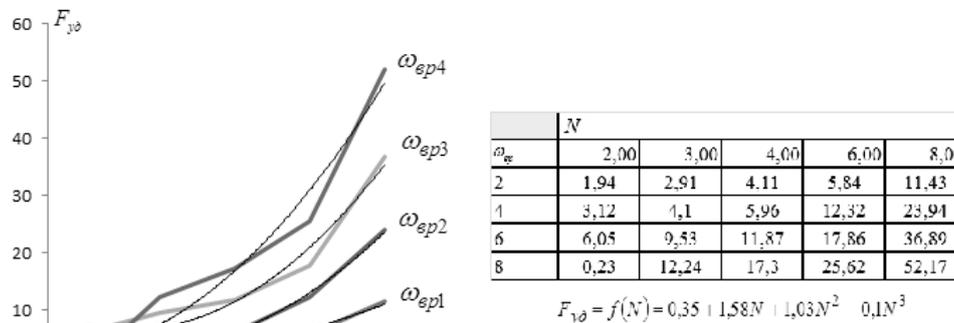


Рисунок 9 – Сила виброударного взаимодействия вала в зависимости от количества консольных лепестков звездочки $F_{y\partial} = f(N)$

В ходе экспериментальных исследований проведена аппроксимация полученных экспериментальных зависимостей полиномом третьего порядка и выполнен статистический анализ полученных данных, результаты представлены в виде аналитических и графических зависимостей:

$$F_{y\partial} = f(E) = 3,02 + 4,57E - 0,69E^2 + 0,057E^3;$$

$$F_{y\partial} = f(l_{np}) = 26,5 - 18,72l_{np} + 4,85l_{np}^2 - 0,43l_{np}^3;$$

$$F_{y\partial} = f(m_0) = 3,02 + 1,39m_0 + 0,58m_0^2 - 0,008m_0^3;$$

$$F_{y\partial} = f(\omega_{ep}) = -0,8 + 7,62\omega_{ep} - 0,85\omega_{ep}^2 + 0,13\omega_{ep}^3;$$

$$F_{y\partial} = f(N) = 0,35 + 1,58N + 1,03N^2 - 0,1N^3.$$

Достоверность полученных экспериментальных результатов обоснована достаточным количеством экспериментов, определенных методами планирования экспериментов. Достоверность идентифицированных моделей обоснована критериями Фишера и Стьюдента при доверительной вероятности 0,95.

Для анализа распределения энергии колебаний по частотному диапазону дополнительно был проведен спектральный анализ полученных виброударных импульсов, который показал наличие в них гармонических составляющих в пределах 10 – 5000 Гц. Спектральный анализ полученных виброударных импульсов показал также, что распределения энергии колебаний по частотному диапазону зависят от всех исследованных в эксперименте параметров. Анализ зависимости спектральной плотности мощности колебаний от исследованных параметров является предметом дальнейших исследований, и будут опубликованы позже.

Выводы. На основе проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Сила взаимодействия звездочки валкового вибрационного классификатора с куском горной массы имеет явно выраженный виброударный характер, зависит от исследованных варьируемых параметров и лежит в диапазоне 10–700 Н. Ранее, экспериментально было установлено, что для разрушения слипшейся горной массы достаточно усилия удара в пределах 100 – 150 Н. Поэтому, предложенное техническое решение подходит для разрушения влажных агломератов состоящих из образований нескольких первичных частиц горной массы, соединенных физическими связями.

2. Энергия колебаний силового воздействия звездочки валкового вибрационного классификатора на кусок горной массы распределена в широком частотном диапазоне от 10 до 5000 Гц и зависит от всех рассмотренных в работе варьируемых параметров $S = F(E, l_{np}, m_0, \omega_{ep}, N)$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Потураев, В.Н. Резиновые и резино-металлические детали машин / В.Н. Потураев. – М.: Машиностроение, 1966. – 300 с.
2. Audio Spectrum Analyzer – OscilloMeter 7.31 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://audio-spectrum-analyzer-oscillometer-1.soft32.com>. – Загл. с экрана.
3. Пат. № 108453 UA, МПК В07В1/12, В07В1/14, В07В1/15, В07В1/28, В07В1/40, В07В1/42. Способ классификации труднодробимого минерального сырья/ В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков, И.В.Ягнюкова. – № а 201404720; заявл. 05.05.2014; опубл. 27.04.2015.
4. Надутый, В.П. Модернизация вибрационного валкового классификатора на основе использования виброударного режима / В.П. Надутый, А.И. Егурнов, И.В. Ягнюкова // Вісник НТУ «ХПІ» (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – 2013. - №57 (1030).– С. 89-96.
5. Надутый, В.П. Синтез параметров валковых классификаторов вибрационного типа / В.П. Надутый, В.А. Остапенко, В.Ф. Ягнюков. – К. : Наук. думка, 2006. – 188 с.
6. Надутый, В.П. Перспективные направления интенсификации переработки минерального сырья / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. / Національна гірнична академія. – Дніпропетровськ, 2002. – Вип. 14(55). – С.110-113.
7. Надутый, В.П. Определение влияния конструктивных параметров вибрационного валкового классификатора на технологические показатели / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков, Л.Н. Прокопишин // Матер. Междунар. XI науч.-техн. конф. "Теория и практика процессов дробления, разделения, смешения и уплотнения материалов". Одесса – п. Затока. / Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ", 2003. – № 17. – С. 75-78.
8. Надутый, В.П. Зависимость производительности валкового классификатора от динамических параметров и свойств горной массы / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков, Л.Н. Прокопишин // Матер. Міжнародної наук.-техн. конф. "Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості". – Кривий Ріг. – Т. 2. – 2004. – С. 51-54.
9. Caughey, T.K. Hula-Hoop: An Example of Heteroparametric Excitation / T.K. Caughey // American Journal of Physics.- Volume 28, Issue 2.- 1960.- pp. 104-109.
10. Надутый, В.П. Результаты экспериментальных исследований зависимости эффективности классификации валкового вибрационного классификатора от его режимных и конструктивных параметров / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков, Л.Н. Прокопишин // Вісник Національного університету "Харківський політехнічний інститут": Збірка наук. праць. Тематичний випуск "Хімія, хімічна технологія та екологія". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2004. – № 40. – С. 149-152.

REFERENCES

1. Poturayev V.N. (1966), *Rezinovye i rezino-metallicheskie detali mashin* [Rubber and rubber-metal machine parts], Mashinostroyeniye, Moscow, USSR.

2. Audio Spectrum Analyzer – OscilloMeter 7.31 (2014), available at: <http://audio-spectrum-analyzer-oscillometer-1.soft32.com> (Accessed 10.07.2015).
3. Nadutyi, V.P., Iagniuikov, V.F. and Iagniuikova, I.V., M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine (2015), Sposob klassifikatsii trudnogrokhotimogo mineralnogo cyriya [Method of classification of hard-to-sieve mineral materials], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. №108453.
4. Nadutyi, V.P., Iegurnov, A.I. and Iagniuikova, I.V. (2013), "Modernization of the vibrating roller classifier based on the vibroimpact mode application", *Visnyk NTU «HPI», Edition: Chemistry, Chemical Technology and Ecology*, vol.57 (1030), pp. 89-96.
5. Nadutyi, V.P., Ostapenko, V.A. and Iagniuikov, V.F. (2006), *Sintez parametrov valkovykh klassifikatorov vibratsionnogo tipa* [The synthesis of parameters of vibrating roller classifiers], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
6. Nadutyi, V.P. and Iagniuikov, V.F. (2002), "Perspective trends of intensification of mineral processing", *Zbagachennya korysnykh kopalyn* [Enrichment of Minerals], vol. 14(55), pp. 110-113.
7. Nadutyi, V.P., Iagniuikov, V.F. and Prokopishyn, L.N. (2003), "Determining the influence of the design parameters of vibrating roller classifier on technological indicators", *Visnyk NTU «HPI»*, vol. 17, pp. 75-78.
8. Nadutyi, V.P., Iagniuikov, V.F. and Prokopishyn, L.N. (2004), "The dependence of the productivity of the roller classifier on the dynamic parameters and properties of the mined rock", *Materialy mizhnarodnoy naukovo-tekhnichnoy konferentsii "Stalyy rozvytok girnycho-metalurgichnoy promyslovosti"*, [Materials of international scientific and technical conference «Sustainable development of mining and metallurgical industry], Kryviy Rih, Ukraine, 12 may 2004, vol.2, pp. 51-54.
9. Caughey, T.K. (1960), "Hula-Hoop: An Example of Heteroparametric Excitation", *American Journal of Physics*, vol. 28, no. 2, pp. 104-109.
10. Nadutyi, V.P., Iagniuikov, V.F. and Prokopishyn, L.N. (2004), "The results of experimental research of the efficiency dependence of classification of vibrating roller classifier on its mode and design parameters", *Visnyk NTU «HPI»*, vol. 40, pp. 149-152.

Об авторе

Ягнюкова Ирина Владимировна, аспирант, инженер в отделе Механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, yagnyuikova@gmail.com

About the author

Iagniuikova Iryna Volodymyrivna, Doctoral Student, Engineer of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipropetrovsk, Ukraine, yagnyuikova@gmail.com

Анотація. В статті наведено результати експериментальних досліджень з визначення сил ударної взаємодії робочих органів валкового вібраційного класифікатора з гірничою масою. Отримано залежності таких сил ударної взаємодії зіркової просіювальної поверхні валкового вібраційного класифікатора з кусковою гірничою масою. Сили ударної взаємодії визначені в залежності від конструктивних параметрів зірочок валків, таких як твердість гумового матеріалу по Шору А, приведена довжина консолі зірочки і кількість консольних пелюсток зірочки і режимних параметрів класифікатора, таких як кутова частота обертання зірочок. Експериментальні дослідження дозволили зробити висновок, що при виборі певних змінних параметрів на просіювальній поверхні, валкового вібраційного класифікатора у вигляді зірочок виникають додаткові сили, здатні зруйнувати внутрішні зв'язки злиплої гірничої маси. Аналіз даних результатів експериментальних досліджень буде представлений в подальших роботах автора.

Ключові слова: сили ударної взаємодії, зіркова просіювальна поверхня, віброударний режим, валковий вібраційний класифікатор, ударні елементи.

Abstract. The article presents results of experimental studies on determining forces of the shock interaction between executive tools of the vibrating roller classifier and the mined rocks. De-