**Надутый В.П.**

д. т. н., професор

**Логинова А.А.**

к.т.н., науч. сотр.

**Сухарев В.В.**

к.т.н., ст.науч.сотр.

*Інститут геотехнічної  
механіки ім. М.С.  
Полякова Національної  
академії наук України*

**Naduty V.****Loginova A.****Sukharev V.**

*Institute of Geotechnical  
Mechanics named M.S.  
Polyakov of the National  
Academy of Sciences of  
Ukraine*

**УДК 622.73:621.926****DOI: 10.37128/2306-8744-2020-2-2**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ДВУХВАЛЬНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО МОДУЛЯ ОТ ВАРЬИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ**

*В статье представлены результаты исследований новой конструкции двухвального центробежного вибрационного модуля, который создан на основе модернизации двухвального дезинтегратора. Отличительной особенностью этой конструкции является наличие дополнительного устройства, обеспечивающего операцию вибрационной классификации по крупности измельчаемой горной массы непосредственно в камере измельчения. Это устраняет ее переизмельчение и увеличивает производительность модуля.*

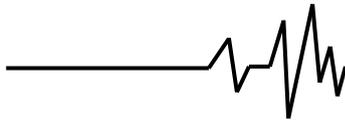
*Поскольку в ранее существующую конструкцию дезинтегратора внесены конструктивные изменения и добавлены новые технологические операции, то выполнен комплекс исследований по определению производительности и затрачиваемой мощности привода модуля в зависимости от наиболее влиятельных режимных параметров и особенностей горной массы. Основными варьируемыми параметрами приняты: количество оборотов вала бил в камере измельчения, частота и амплитуда колебаний камеры измельчения, крупность и прочность измельчаемой горной массы, а также устанавливалось влияние процесса отсева готового класса крупности в камере измельчения на производительность и затрачиваемую мощность привода.*

*Полученные экспериментальные зависимости этих величин от варьируемых параметров представлены в виде графиков с дальнейшей их идентификацией регрессионными моделями, что позволит при проектировании параметрического ряда модуля (исходя из исходных требований) определить его основные конструктивные и силовые параметры.*

*Установлено, что эффективность отсева горной массы в центробежном вибрационном модуле находится в пределах 60÷70 % в зависимости от класса крупности разделения и плотности перерабатываемой горной массы, а также от содержания в ее загрузке готового класса крупности. При этом производительность модуля увеличивается на 20 %, а с использованием вибровозбуждения камеры измельчения – на 25÷30 %.*

*Результаты исследований экспериментального образца модуля показали эффективность выполненной модернизации и позволяют рекомендовать его для широкого промышленного использования.*

**Ключевые слова:** модуль, горная масса, удар, вибрация, классификация, производительность, мощность.



**Введение.** Созданный в ИГТМ двухвальный дезинтегратор и выполненный комплекс исследований его работоспособности и эффективности показали перспективность использования этой конструкции при измельчении горной массы незначительной крупности (менее 10 мм) для ее дальнейшего использования или обогащения [1-4]. Это необходимо, прежде всего, для переработки огромных техногенных отвалов золы теплоэлектростанций, при извлечении редких и драгметаллов, а также при комплексной переработке базальтового сырья для отдельного обогащения базальта, туфа и лавобрекчии.

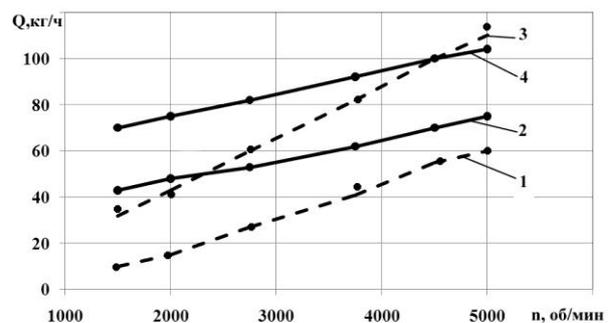
**Целью создания** этого типа дезинтеграторов было снижение энергопотребления, увеличение производительности тонкого измельчения, а также снижение металлического намола в рабочих органах, например в шаровых мельницах между шарами и металлической футеровкой, в роторных – между билами ротора и кусковой горной массой.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В отличие от одновальных центробежных дезинтеграторов в двухвальных процесс разрушения кусков горной массы происходит по другому механизму – менее энергоемкому – и по пути наименьшего сопротивления за счет встречного движения двух потоков, направляемых билами роторов, которые вращаются навстречу друг другу. При этом энергия взаимодействия потоков удваивается, и при их встрече преобладают сдвиговые деформации взаимодействия между частицами двух потоков, что по закону Кулона значительно ускоряют их разрушение. В то время, когда в одновальных дезинтеграторах разрушение происходит за счет сжатия при ударе разгоняемых кусков о футеровку камеры [5, 6].

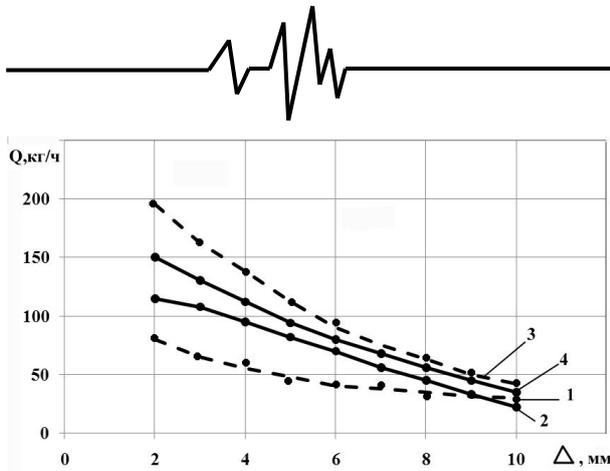
Новая конструкция исследуемого двухвального центробежного дезинтегратора имеет модульный характер, поскольку в результате модернизации в нем теперь выполняется несколько операций. Для этого в днище камеры измельчения вмонтировано сито с необходимым размером ячейки, и в процессе измельчения происходит отсев готовой массы по крупности, что предотвращает ее переизмельчение [7, 8]. Поскольку корпус камеры установлен на амортизаторы и на боковой поверхности снабжен двумя вибраторами, то в процессе их работы происходит виброперемещение материала и его сегрегация. Этим интенсифицируется отсев готового продукта и транспортирование надрешетного к разгрузке

**Результаты исследования.** За основные показатели работы модуля приняты его производительность и затрачиваемая мощность привода. В качестве варьируемых параметров в экспериментах использовались: частота вращения вала, исходная крупность измельчаемого материала и его прочность, амплитуда колебаний вибровозбудителя и частота колебаний камеры измельчения. В процессе отработки технологии измельчения варьировались три параметра. Полученные результаты исследований представлялись в виде графической зависимости и аппроксимировались аналитической зависимостью производительности модуля от варьируемых параметров.

Исследования показателей работы модуля проводились на опытном образце. При этом использовалась горная масса в виде гранита, базальта, туфа и известняка, а для корректного сравнения результатов время измельчения во всех случаях было постоянным ( $T = 10$  мин.) Результаты исследований представлены в виде графиков установленных зависимостей. На рис. 1 показана зависимость производительности  $Q_1$  модуля от частоты вращения вала привода с учетом прочности материала.



**Рис. 1.** Зависимость производительности  $Q_1$  модуля от частоты вращения вала  $n$  при измельчении  $\delta = 40$  кг/мм<sup>2</sup> (кривые 3, 4) материала прочностью  $\delta = 110$  кг/мм<sup>2</sup> (кривые 1, 2) и крупностью (-10÷7,5 мм)  
1, 3 – результаты эксперимента;  
2, 4 – математическое моделирование  
1, 2 – для  $\delta = 110$  кг/мм<sup>2</sup>;  
3, 4 – для  $\delta = 40$  кг/мм<sup>2</sup>



**Рис. 2. Зависимость производительности  $Q_2$  модуля от крупности материала прочностью  $\delta = 110 \text{ кг/мм}^2$  (кривые 1, 2) и прочностью  $\delta = 40 \text{ кг/мм}^2$  (кривые 3, 4) с частотой вращения вала 2800 об/мин.**  
1, 3 – результаты эксперимента;  
2, 4 – математическое моделирование

Графическая зависимость производительности модуля  $Q_2$  от крупности измельчаемого материала показана на рис. 2. При этом частота вращения вала привода оставалась постоянной ( $n = 2800$  об/мин.).

В результате корреляционно-регрессионного анализа экспериментальных данных получено следующее уравнение множественной регрессии

$$Q_1 = 152,8 + 0,1n - 11,4\Delta - 0,38\delta$$

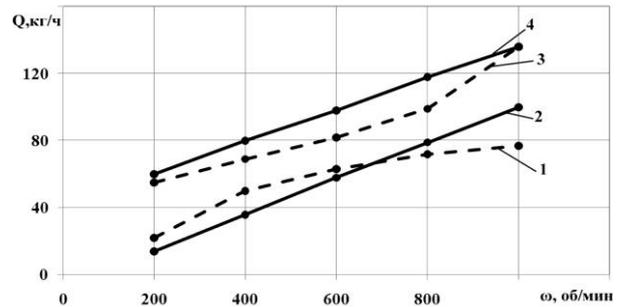
где  $n$  – частота вращения вала привода, об/мин.

$\Delta$  – исходная крупность материала, ( $-10 \div 7,5$  мм)

$\delta$  – прочность материала,  $\text{кг/мм}^2$ .

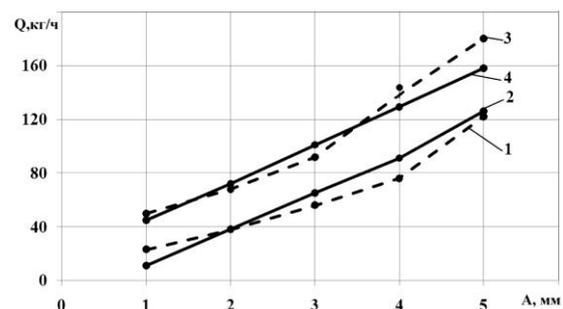
Проверка адекватности полученной модели проводилась в соответствии с критерием Фишера. Полученное расчетное значение составило 10,83, табличное – 0,69, что указывает на адекватность полученного уравнения с достоверностью 90 % и множественным коэффициентом детерминации 0,62.

Поскольку модуль имеет два вибровозбудителя, закрепленных на камере измельчения, то выполнены исследования по влиянию на его производительность частоты и амплитуды колебаний корпуса камеры. Результаты исследований представлены на рис. 3 и рис. 4. При этом частота вращения вибровозбудителей не превышает 1000 об/мин (16,6 Гц), а амплитуда колебаний камеры исследовалась в пределах  $A = 5$  мм. Это связано с получением рациональных показателей по производительности ротора и с напряженным состоянием его механической части.



**Рис. 3. Зависимость производительности модуля  $Q$  от частоты вибрации при измельчении материала прочностью  $\delta = 110 \text{ кг/мм}^2$  и  $\delta = 40 \text{ кг/мм}^2$  при амплитуде  $A = 4$  мм и частоте вибрации 1000 об/мин.**

1, 3 – результаты эксперимента;  
2, 4 – математическое моделирование  
1, 2 – для  $\delta = 110 \text{ кг/мм}^2$ ,  
3, 4 – для  $\delta = 40 \text{ кг/мм}^2$



**Рис. 4. Зависимость производительности модуля  $Q$  от амплитуды вибрации при измельчении материала прочностью  $\delta = 110 \text{ кг/мм}^2$  (кривые 1, 2) и  $\delta = 40 \text{ кг/мм}^2$  (кривые 3, 4) при частоте вибрации 1000 об/мин.**

1, 3 – результаты эксперимента;  
2, 4 – математическое моделирование

На основании экспериментальных данных на рис. 3 и рис. 4 выполнен регрессионный анализ для получения уравнения по определению производительности от факторных признаков (амплитуды и частоты колебаний вибровозбудителя, прочности материалов):

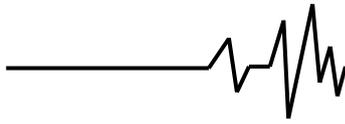
$$Q_2 = 63,9 + 32,19A + 0,1\omega - 0,65\delta$$

где  $A$  – амплитуда колебаний камеры при вибровозбуждении, мм;

$\omega$  – частота колебаний вибровозбудителя, об/мин (Гц);

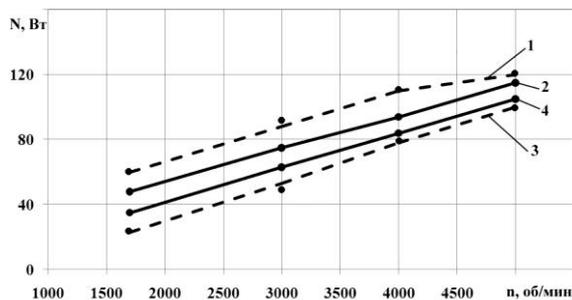
$\delta$  – прочность измельчаемого материала,  $\text{кг/мм}^2$ .

Проверка адекватности полученной модели в соответствии с критерием Фишера показала расчетное значение 28,4 (табличное –

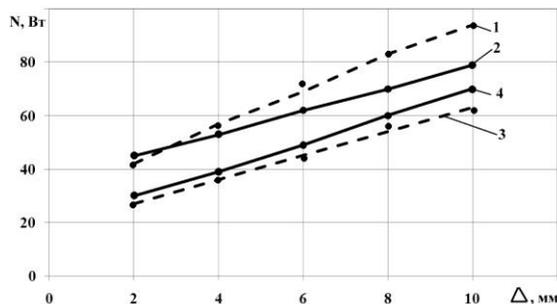


1,74, достоверность – 90 %, множественный коэффициент детерминации – 0,84), что говорит об адекватности полученного уравнения.

При проектировании и эксплуатации двухвального центробежного модуля важно знать характер зависимости затрачиваемой мощности привода и влияние на ее показатели варьируемых факторов, которые используются при отработке параметров технологии. Поэтому, как и в случае с производительностью, экспериментально определялся характер зависимости потребляемой мощности ( $N$ , Вт) от количества оборотов вала привода ( $n$ , об/мин), от крупности частиц измельчаемого материала ( $\Delta$ , мм) с учетом их прочности ( $\delta$ , кг/мм<sup>2</sup>). Графические результаты этих исследований представлены на рисунках 5 и 6.



**Рис. 5. Зависимость потребляемой мощности  $N$  от частоты вращения вала при измельчении материала прочностью  $\delta = 110$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\delta = 40$  кг/мм<sup>2</sup> и крупностью ( $-10 \div 7,5$  мм)**  
1, 3 – результаты эксперимента;  
2, 4 – математическое моделирование  
1, 2 – для  $\delta = 110$  кг/мм<sup>2</sup>,  
3, 4 – для  $\delta = 40$  кг/мм<sup>2</sup>



**Рис. 6. Зависимость потребляемой мощности  $N$  от исходной крупности  $\Delta$  при измельчении материала прочностью  $\delta = 110$  кг/мм<sup>2</sup> (кривые 1, 2) и  $\delta = 40$  кг/мм<sup>2</sup> с частотой вращения вала 2800 об/мин (кривые 3, 4)**  
1, 3 – результаты эксперимента;  
2, 4 – математическое моделирование

Вследствие корреляционного анализа экспериментальных результатов получено уравнение множественной регрессии

$$N_1 = -50,4 + 0,02n + 4,4\Delta + 0,19\delta$$

где  $n$  – количество оборотов вала привода, об/мин;

$\Delta$  – исходная крупность материала, мм;

$\delta$  – прочность материала, кг/мм<sup>2</sup>.

Проверка адекватности модели показала расчетное значение 38,4 (табличное – 1,72, достоверность – 90 %, множественный коэффициент детерминации – 0,86), что указывает на адекватность полученного уравнения.

Отмечено влияние вибрации, в частности частоты амплитуды колебаний камеры измельчения, на затрачиваемую мощность процесса, поэтому выполнены исследования по определению зависимости мощности привода от частоты и амплитуды возмущений камеры измельчения. Результаты исследований представлены на рисунках 7 и 8.

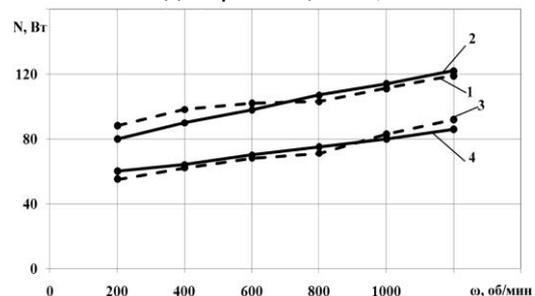
По результатам исследований получено регрессионное уравнение для определения потребляемой мощности привода, указывающее на ее зависимость от таких факторных признаков как амплитуда колебаний камеры измельчения ( $A$ , мм), частоты вибровозмущений ( $\omega = 1200$  об/мин = 20 Гц) и прочности материала ( $\delta$ , кг/мм<sup>2</sup>)

$$N_2 = 3,59 + 7,53A + 0,03\omega - 0,42\delta$$

где  $A$  – амплитуда колебаний камеры,  $A = 4,0 \div 5,0$  мм;  $\omega$  – частота вибровозмущений камеры,  $\omega = 200 \div 1200$  об/мин =  $3,3 \div 20,0$  Гц;

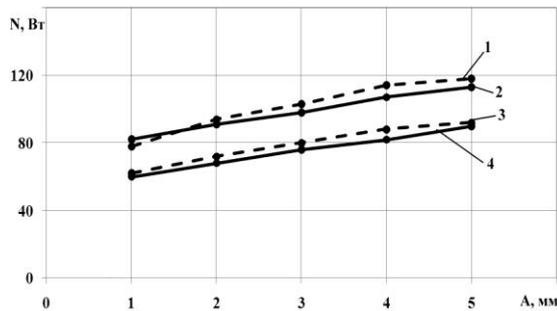
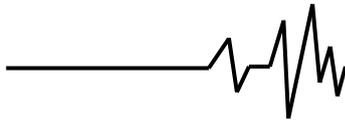
$\delta$  – прочность измельчаемого материала,  $\delta = 40, 110$  кг/мм<sup>2</sup>.

Адекватность модели подтверждена сравнением расчетного 164,5 и табличного 1,73 Критерия Фишера с достоверностью 90 % и множественной детерминацией 0,96.



**Рис. 7. Зависимость потребляемой мощности  $N$  от частоты вибрации  $\omega$  при измельчении материала прочностью  $\delta = 110$  кг/мм<sup>2</sup> (кривые 1, 2) и  $\delta = 40$  кг/мм<sup>2</sup> (кривые 3, 4) при амплитуде 4 мм**

1, 3 – результаты эксперимента; 2, 4 – математическое моделирование



**Рис. 8. Зависимость потребляемой мощности  $N$  от амплитуды колебаний  $A$  камеры при измельчении материала прочностью  $\delta = 110 \text{ кг/мм}^2$  (кривые 1, 2) и  $\delta = 40 \text{ кг/мм}^2$  (кривые 3, 4) при частоте вибрации 1000 об/мин.**

**1, 3 – результаты эксперимента;  
2, 4 – математическое моделирование**

Таким образом, в результате модернизации конструкции двухвального модуля, установленная в днище камеры измельчения сетка способствует повышению производительности модуля, при этом подрешетный материал не переизмельчен. В процессе исследований установлено, что эффективность рассева находится в пределах  $60 \div 70 \%$  в зависимости от класса крупности разделения и плотности перерабатываемой горной массы, а также от содержания в ее загрузке готового класса крупности. При этом установлено, что производительность модуля увеличивается на  $20 \%$ , а при вибровозбуждении камеры измельчения – на  $25 \div 30 \%$ .

**Выводы.** В результате выполненных исследований показана эффективность использования двухвального центробежного вибрационного модуля, которая проявляется в увеличении его производительности почти в два раза по отношению к одновальному. При этом установлена степень влияния каждого из регулируемых параметров на производительность и затрачиваемую мощность привода. Установлено, что при измельчении горной массы малой и средней прочности при исходной крупности  $\Delta = -10 \text{ мм}$  рациональный режим работы обеспечивается при вращении приводных валов до  $n = 2800 \text{ об/мин}$ , а вибропривода  $n = 1000 \div 1500 \text{ об/мин}$  с амплитудой колебаний камеры  $A = 4 \div 5 \text{ мм}$ . Наличие классифицирующей сетки в днище камеры измельчения устраняет переизмельчение подрешетного продукта, что важно при его дальнейшем обогащении на магнитных и электрических сепараторах.

Вторым положительным фактором влияния сетки является увеличение производительности модуля до  $30 \%$  на основе интенсификации пропускной способности

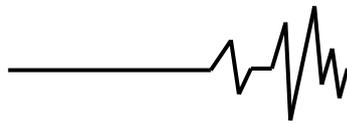
камеры и виброразгрузки надрешетного продукта. Разработанные математические модели определения производительности и затрачиваемой мощности модуля при варьировании регулируемыми параметрами позволяют оптимизировать его параметры при эксплуатации или проектировании.

#### Список использованных источников

1. Надутый В.П., Логинова А.А., Сухарев В.В. Эффективность использования ударно-центробежного дезинтегратора, реализующего сдвиговые деформации при разрушении горной массы. *Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України*. – Дніпро, 2016. – Вип. 131. – С. 26-32.
2. Надутый В.П., Джамиль Хаддад, Логинова А.О., Сухарев В.В. The results of experimental studies of influence of variable parameters on the performance indicators of shock-centrifugal disintegrator. *Науковий вісник НГУ*. – Дніпро. – Вип. 1. – 2019. – С. 43–48. DOI: 10.29202/nvngu/2019-1/3
3. Надутый В.П., Логинова А.А., Сухарев В.В. Mathematical modeling of the main technological parameters of the two-rotor shock-centrifugal disintegrator on the basis of correlation analysis. *E3S Web of Conferences 109, 00060(2019). Essays of Mining Science and Practice* DOI: 10.1051/e3sconf/201910900060.
4. Надутый В.П., Логинова А.О., Сухарев В.В. Результаты исследований зависимости производительности вибрационного двухвального центробежного модуля. *Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал*. – Вінниця, 2019. Вип. №3(94), С. 5-10.
5. Сокур Н.И., Сокур И.Н., Сокур Л.М. Центробежные дробилки: Монография – Кременчук: КДПУ, 2009. – 202 с.
6. Сокур Н.И., Потураев В.Н., Бабец Е.К. Дробление и измельчение руд – Кривой Рог: ВЭЖА, 2000. – 290 с.
7. Надутый В.П., Логинова А.О., Сухарев В.В. Спосіб дезінтеграції матеріалу. Патент України на корисну модель № 137333, B02C 13/00, заявл. 26.04.2019, опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19
8. Булат А.Ф., Надутый В.П., Логинова А.О., Сухарев В.В. Ударно-відцентровий дезінтегратор. Патент України на корисну модель № 132113, B02C 13/14, 19/00, заявл. 12.09.2018 опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3

#### Список источников в транслитерации

1. Naduty V.P., Loginova A.A., Sukharev V.V. Effektivnost icpolzovaniya udarno-tsentrobezhnogo dezintegratora,



realizuyushego sdvigovyye deformatsyi pri razrushenii gornoy massy. *Heotekhnichna mekhanika : Mizhvid. zb. nauk. prats / IGTM NAN Ukrainy.* – Vyp. 131. – Dnipro, 2016. – S. 26-32.

2. Nadutyi, V., Haddad, J., Loginova, A., Sukharev, V. The results of experimental studies of influence of variable parameters on the performance indicators of shock-centrifugal disintegrator. *Naukovyy visnyk NHU.* – Dnipro. – Vyp.1. – 2019. – С. 43–48. DOI: 10.29202/nvngu/2019-1/3

3. Nadutyi V.P., Loginova A.A., Sukharev V.V. Mathematical modeling of the main technological parameters of the two-rotor shock-centrifugal disintegrator on the basis of correlation analysis. *E3S Web of Conferences 109, 00060(2019). Essays of Mining Science and Practice.* DOI: 10.1051/e3sconf/201910900060.

4. Nadutyi V.P., Loginova A.A., Sukharev V.V. Rezultaty yssledovany zavysymosti proyzvodytelnosti vybratsyonnoho dvukhvalnoho tsentrobezhnoho. *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh: Vseukr. nauk.-tekhn. zhurnal.* – Vinitsya, 2019. Vyp. №3(94), S. 5-10.

5. Sokur N.I., Sokur I.N., Sokur L.M. Tsentrobezhnyye drobilki : Monografiya /. – Kremenchug : KDPU, 2009. – 202 s.

6. Sokur N.I., Poturayev V.N., Babets Ye.K. Drobieniye I izmelcheniye rud – Krivoy Rog : VEZNA, 2000, – 290 s.

7. Nadutyi V.P., Loginova A.A., Sukharev V.V. Sposib dezintehratsiyi materialu. Patent Ukrainy na korysnu model № 137333, B02S 13/00, zayavl. 26.04.2019, opubl. 10.10.2019, Bul. № 19.

8. Bulat A.F., Nadutyi V.P., Loginova A.A., Sukharev V.V. Udarno-vidtsentrovyy dezintehrator. Patent Ukrainy na korysnu model № 132113, B 02 C 13/14, 19/00 zayavl. 12.09.2018, opubl. 11.02.2019, Bul. № 3.

#### DETERMINATION OF DEPENDENCE OF OPERATING INDICATORS OF TWO-SHAFT CENTRIFUGAL MODULE ON VARIABLE PARAMETERS

The article presents the results of studies of a new design of a two-shaft centrifugal vibration module, which was created on the basis of the modernization of a two-shaft disintegrator. A distinctive feature of this design is the presence of an additional device that provides the operation of vibrational classification by size of the crushed rock mass directly in the grinding chamber. This eliminates its regrinding and increases the performance of the module.

Since structural changes were introduced into the previously existing disintegrator design and new technological operations were added, a set of studies was carried out to determine the performance and expended drive power of the module, depending on the most influential operating parameters and rock mass characteristics. The main variable parameters were adopted: the number of revolutions of the beater shaft in the grinding chamber, the frequency and amplitude of oscillations of the grinding chamber, the size and strength of the crushed rock mass, and the effect of the screening process of the finished size class in the grinding chamber on the productivity and power consumption of the drive was established.

It has been established that the efficiency of rock mass screening in a centrifugal vibration module is within 60 ÷ 70% depending on the separation size class and the density of the processed rock mass, as well as on the content of the finished size class in its loading. In this case, the performance of the module increases by 20%, and with the use of vibration excitation of the grinding chamber - by 25 ÷ 30%.

The obtained experimental dependences of these values on variable parameters are presented in the form of graphs with their further identification by regression models, which will allow us to determine its main structural and power parameters when designing the parametric series of the module (based on the initial requirements).

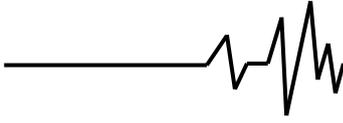
The results of studies of the experimental model of the module showed the effectiveness of the modernization and allow us to recommend it for wide industrial use.

**Keywords:** module, rock mass, shock, vibration, classification, productivity, capacity.

#### ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ДВОХВАЛЬНОГО ВІДЦЕНТРОВОГО МОДУЛЯ ВІД ЗМІННИХ ПАРАМЕТРІВ

В статті представлені результати досліджень нової конструкції двохвального відцентрового вібраційного модуля, який створений на основі модернізації двохвального дезінтегратора. Відмінною особливістю цієї конструкції є наявність додаткового пристрою, що забезпечує операцію вібраційної класифікації по крупності подрібнюваної гірської маси безпосередньо в камері подрібнення. Це усуває її переподрібнення і збільшує продуктивність модуля.

Оскільки в раніше існуючу конструкцію дезінтегратора внесені конструктивні зміни і додані нові технологічні операції, то виконаний комплекс досліджень по визначенню продуктивності і витрачається потужності приводу модуля в залежності від найбільш



впливових режимних параметрів і особливостей гірської маси. Основними змінними параметрами прийняті: кількість обертів вала в камері подрібнення, частота і амплітуда коливань камери подрібнення, крупність і міцність подрібнюваної гірської маси, а також встановлювалося вплив процесу відсіву готового класу крупності в камері подрібнення на продуктивність і затрачену потужність приводу.

Отримані експериментальні залежності цих величин від змінних параметрів представлені у вигляді графіків з подальшою їх ідентифікацією регресійною моделлю, що дозволить при проектуванні параметричного ряду модуля (виходячи з вихідних вимог) визначити його основні конструктивні та силові параметри.

Встановлено, що ефективність розсівання гірничої маси в відцентровому вібраційному модулі знаходиться в межах  $60 \div 70\%$  в залежності від класу крупності розділення і щільності переробляється гірської маси, а також від змісту в її завантаженні готового класу крупності. При цьому продуктивність модуля збільшується на 20%, а з використанням віброзбудження камери подрібнення - на  $25 \div 30\%$ .

Результати досліджень експериментального зразка модуля показали ефективність виконаної модернізації і дозволяють рекомендувати його для широкого промислового використання.

**Ключові слова:** модуль, гірська маса, удар, вібрація, класифікація, продуктивність, потужність.

### Відомості про авторів

**Надутьий Володимир Петрович** доктор технічних наук, професор, завідувач відділу механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, (49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 2а, [nadutyvp@gmail.com](mailto:nadutyvp@gmail.com))

**Логінова Анастасія Олександрівна** кандидат технічних наук; науковий співробітник відділу механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 2а, [logan.anlim@gmail.com](mailto:logan.anlim@gmail.com))

**Сухарєв Віталій Віталійович** кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, (49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 2а, [agnivik@ukr.net](mailto:agnivik@ukr.net))

**Надутьий Владимир Петрович** доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова Национальной академии наук Украины, (49005, г. Днепр, ул. Симферопольская, 2а, [nadutyvp@gmail.com](mailto:nadutyvp@gmail.com))

**Логінова Анастасія Александровна** кандидат технических наук; научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова Национальной академии наук Украины (49005, г. Днепр, ул. Симферопольская, 2а, [logan.anlim@gmail.com](mailto:logan.anlim@gmail.com))

**Сухарев Виталий Витальевич** кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова Национальной академии наук Украины, (49005, г. Днепр, ул. Симферопольская, 2а, [agnivik@ukr.net](mailto:agnivik@ukr.net))

**Naduty Vladimir Petrovich** Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanics of Machines and Processes of Mineral Processing, Institute of Geotechnical Mechanics named M.S. Polyakov of the National Academy of Sciences of Ukraine (49005, Dnipro city, st. Simferopol, 2a, [nadutyvp@gmail.com](mailto:nadutyvp@gmail.com))

**Loginova Anastasia Alexandrovna** Candidate of technical sciences, Researcher, Department of Machine Mechanics and Mineral Processing, Institute of Geotechnical Mechanics named M.S. Polyakov of the National Academy of Sciences of Ukraine (49005, Dnipro city, st. Simferopol, 2a, [logan.anlim@gmail.com](mailto:logan.anlim@gmail.com))

**Sukharev Vitaliy Vitalievich** Candidate of technical sciences, Senior Researcher, Department of Machine Mechanics and Mineral Processing, Institute of Geotechnical Mechanics named M.S. Polyakov of the National Academy of Sciences of Ukraine (49005, Dnipro city, st. Simferopol, 2a, [agnivik@ukr.net](mailto:agnivik@ukr.net))