**Надуть В.П.**

д. т. н., професор

Логінова А.О.

к.т.н., доцент

Сухарев В.В.

к.т.н., ст. наук. спів.

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

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

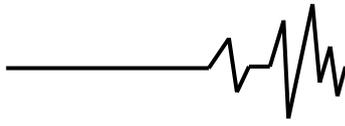
*Institute of Geotechnical
Mechanics named M.S.
Polyakov of the National
Academy of Sciences of
Ukraine*

УДК 622.73:621.926**DOI: 10.37128/2306-8744-2019-3-1**

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВИБРАЦИОННОГО ДУХВАЛЬНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО МОДУЛЯ ОТ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

В статье представлена новая конструкция вибрационного двухвального центробежного модуля, предназначенного для измельчения и классификации горной массы. В данной конструкции, кроме измельчения, добавилась операция классификации или отсева измельченной массы, что не допускает ее переизмельчения и увеличивает производительность устройства. Это достигается за счет установки в днище камеры измельчения сетки с ячейками в соответствии с требуемым классом крупности. При этом процесс классификации интенсифицируется наличием вибрации от укрепленных на корпусе камеры вибровозбудителей и установки камеры на упругие опоры. Возвратно-поступательные горизонтальные колебания камеры с заданными амплитудой и частотой способствуют сегрегации измельчаемой горной массы в слое по крупности, что положительно сказывается на эффективности классификации и на измельчении. Наличие вибрации способствует разгрузке надрешетного продукта из камеры измельчения. Также в статье рассмотрены выполненные на вибрационном двухвальном центробежном модуле экспериментальные исследования по определению зависимости производительности данной конструкции от пяти варьируемых факторов: оборотов вала роторов (n , об/мин), крупности загружаемой горной массы (Δ , мм), прочности горной массы (σ , кг/мм²), частоты колебаний камеры (ω , об/мин) и амплитуды ее колебаний (A , мм). Проведенные исследования показали работоспособность и повышенную производительность новой конструкции по отношению к центробежному дезинтегратору без классифицирующей сетки и вибрации. Результаты работы позволяют рекомендовать исследуемую конструкцию для изготовления экспериментального образца по заданным исходным требованиям, а установленные зависимости ($Q = f(n, \Delta, \sigma, \omega, A)$) дают возможность разработать математическую модель процесса измельчения в данной установке для расчета требуемых параметров.

Ключевые слова: центробежный дезинтегратор, классификация, вибрация, удар, горная масса, производительность.



В настоящее время возникла необходимость в разработке новых конструкций измельчительного оборудования, поскольку существующие конструкции не соответствуют постоянно повышающимся требованиям к снижению энергии, затрачиваемой на измельчение. Перспективным направлением таких разработок является использование на мелких стадиях дробления и измельчения конструкций ударно-центробежного типа [1-4].

Разработанный ранее двухроторный ударный центробежный дезинтегратор и проведенные исследования его работоспособности показали перспективность данной конструкции [5, 6]. Его преимущество перед однороторным дезинтегратором заключается в использовании направленных навстречу потоков измельчаемого материала в центральной зоне измельчительной камеры. При этом преобладают сдвиговые деформации при соударении частиц, что требует значительно меньше энергии для их разрушения.

Дальнейшая модернизация конструкции основывалась на результатах ее испытаний и позволила объединить в одном дезинтеграторе несколько операций по переработке загружаемой горной массы. В частности, кроме измельчения

добавилась операция классификации или отсева измельченной массы, что не допускает ее переизмельчения и увеличивает производительность устройства. Это достигается за счет установки в днище камеры измельчения сетки с ячейками в соответствии с требуемым классом крупности. При этом процесс классификации интенсифицируется наличием вибрации от укрепленных на корпусе камеры вибровозбудителей и установки камеры на упругие опоры. Возвратно-поступательные горизонтальные колебания камеры с заданными амплитудой и частотой способствуют сегрегации измельчаемой горной массы в слое по крупности, что положительно сказывается на эффективности классификации и на измельчении. Наличие вибрации способствует разгрузке надрешетного продукта из камеры измельчения.

Таким образом, наличие нескольких дополнительных операций в дезинтеграторе созданной ранее конструкции [6] превратили его в вибрационный двухвальный центробежный модуль [7, 8]. Особенности конструкции модуля показаны на рис. 1.

].

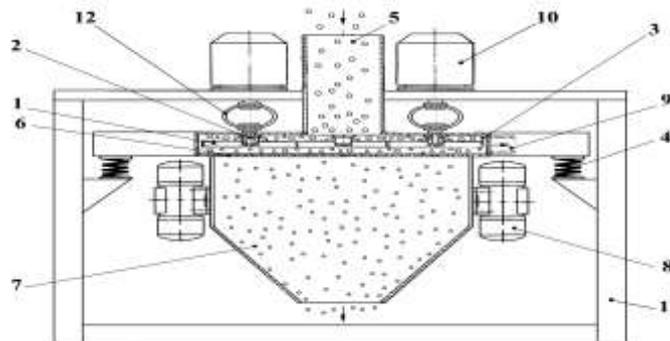


Рис. 1. Конструкция вибрационного двухвального центробежного модуля

1 – лопатки ротора; 2 – вал ротора; 3 – камера измельчения; 4 – упругие опоры модуля; 5 – узел загрузки; 6 – сетка; 7 – бункер; 8 – вибровозбудитель; 9 – разгрузочный патрубок; 10 – двигатель ротора; 11 – рама модуля; 12 – муфта

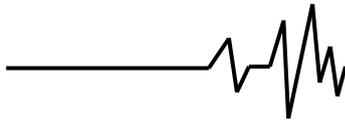
Материал для дезинтеграции поступает через узел загрузки 5 в камеру измельчения 3, где происходит его измельчение за счет вращающихся навстречу друг другу валов роторов 2 и лопаток 1. Измельченный материал через сетку 6 поступает в бункер 7. Интенсивность классификации через сетку 6 регулируется вибровозбудителем 8, а разгрузка надрешетного продукта (если в этом есть необходимость) осуществляется через патрубок 9. Роторы с лопатками вращаются двигателями 10, установленными на раме 11.

Исследования работоспособности модуля и его эффективности проводились на лабораторном образце. При этом для получения достоверной сравнительной информации по

результатам испытаний ранее созданного дезинтегратора [5] использовалась прежняя горная масса в виде гранита, базальта, туфа и известняка при постоянном времени измельчения во всех экспериментах, равном $T = 10$ мин.

Целью экспериментальных исследований являлось определение влияния на производительность модуля (Q , кг/ч) следующих факторов: оборотов вала роторов (n , об/мин), крупности загружаемой горной массы (Δ , мм), прочности горной массы (σ , кг/мм²), частоты колебаний камеры (ω , об/мин) и амплитуды ее колебаний (A , мм).

Конструкция модуля работает следующим образом: при вращении лопаток ротора 1, насаженных на вал ротора 2, в камере



измельчения 3 происходит измельчение горной массы за счет энергии встречных потоков вращающихся лопаток ротора в одну сторону. Установка модуля на упругие опоры 4 позволяет при загрузке исходной горной массы 5 находиться постоянно во взвешенном состоянии на сетке 6 и постоянном отсеве готового класса крупности в бункер 7 за счет горизонтальных его колебаний с помощью вибраторов 8. В случае необходимости разгрузки недоизмельченного материала или полной разгрузки камеры 3 открывается разгрузочный патрубок 9. Амплитуда и частота колебаний камеры 3 и бункера 7 регулируются параметрами вибровозбудителей 8. Установка

всего рабочего органа модуля на упругие опоры 4 на раме 11 позволяет обеспечивать защиту двигателей 10 роторов от вибрации и возможность свободных колебаний рабочего органа за счет податливости эластичных лепестковых муфт 12.

При такой конструктивной схеме модуля возникает необходимость установить зависимость его производительности от частоты оборотов роторов 2 (n , об/мин) от крупности исходного материала (Δ , мм), от прочности горной массы (σ , кг/мм²). Эти зависимости определены на изготовленном лабораторном образце модуля. Характер установленных зависимостей представлен на рисунках 2-4.

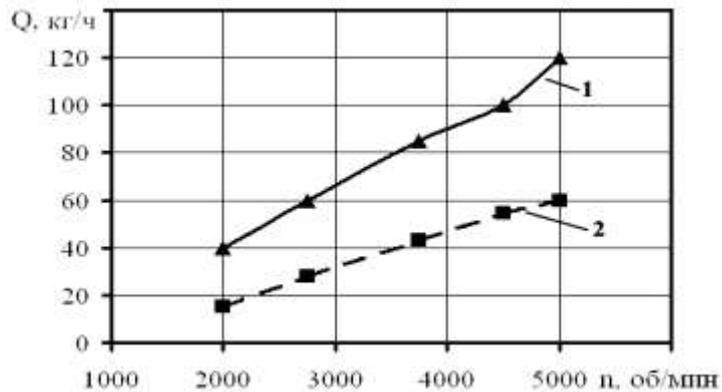


Рис. 2. Зависимость производительности модуля от оборотов вала привода
1 – туф, известняк; 2 – базальт, гранит

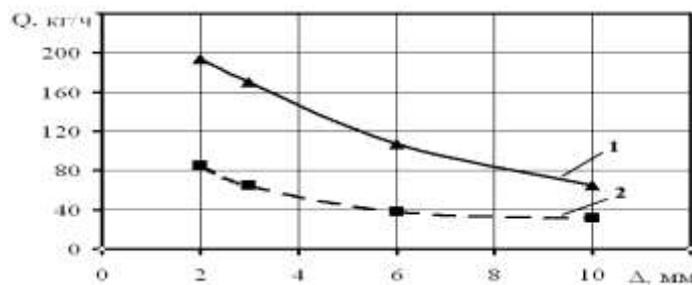


Рис. 3. Зависимость производительности модуля от крупности исходного продукта
1 – туф, известняк; 2 – базальт, гранит

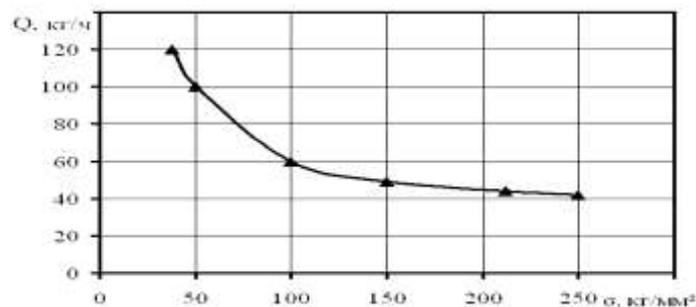


Рис. 4. Зависимость производительности модуля от прочности исходного продукта

Эксперименты, представленные на рис. 2-4, проводились без использования вибрационного воздействия, а зависимость производительности

вибрационного двухвального центробежного модуля от частоты колебаний камеры (ω , об/мин) и от ее амплитуды (A , мм) отображены на рис. 5-6.

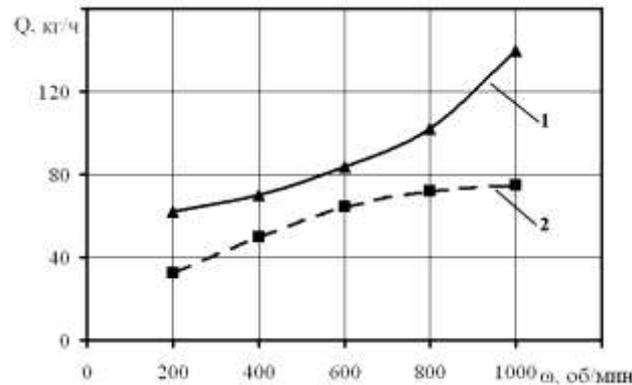
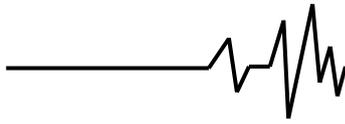


Рис. 5. Зависимость производительности модуля от частоты вибрационных колебаний с амплитудой $A = 4,0$ мм
1 – туф, известняк; 2 – базальт, гранит

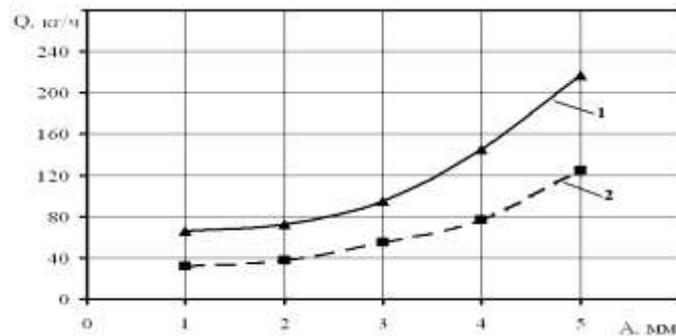


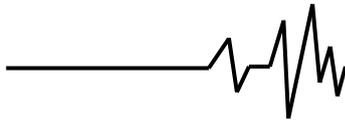
Рис. 6. Зависимость производительности модуля от амплитуды колебаний камеры измельчения (A , мм)
1 – туф, известняк; 2 – базальт, гранит

При проведении экспериментов по измельчению горной массы использовались гранит и базальт в качестве твердой породы, а также цеолит-сметитовый туф и известняк в качестве относительно менее прочной горной массы. Такая избирательность горной массы вызвана тем, что центробежный метод измельчения не рекомендуется для переработки горных пород повышенной прочности. В процессе исследований зависимости производительности модуля от влияющих факторов возникает необходимость проведения каждого эксперимента в одном временном интервале. Это еще важно потому, что необходимо выполнить сравнение результатов новой конструкции модуля с созданным ранее двухвальным центробежным дезинтегратором и показать преимущества новой конструкции. Поэтому во всех выполненных исследованиях был выдержан интервал $T = 10$ мин. Таким образом, выполненные исследования по определению зависимости производительности вибрационного модуля дезинтегратора от пяти варьируемых факторов показали его работоспособность. Они показали практически двукратный рост производительности по отношению к центробежному дезинтегратору без классифицирующей сетки и вибрации. Полученные результаты позволяют рекомендовать

исследуемую конструкцию для изготовления экспериментального образца по заданным исходным требованиям, а установленные экспериментальные зависимости $Q = f(n, \Delta, \sigma, \omega, A)$ дают возможность разработать математическую модель процесса измельчения для расчета требуемых параметров экспериментального образца

Список використаних джерел

1. Биленко Л. Ф. Приоритетные направления повышения селективности раскрытия минералов в процессах подготовки руды к обогащению. *Вестник НГУ «ХПИ»*. Харьков: ХПИ, 2012. Вып. 59. С. 3–12.
2. Сокур Н. И., Сокур И. Н., Сокур Л. М. Центробежные дробилки: монография. Кременчуг: КДПУ, 2009. 202 с.
3. Подготовительные процессы: справочник по обогащению руд. / под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. М.: Недра, 1982. 366 с.
4. Сокур Н. И., Потураев В. Н., Бабец Е. К. Дробление и измельчение руд. Кривой Рог: ВЭЖА, 2000. 290 с.
5. 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.

6. Ударно-відцентровий дезінтегратор. : пат. 116387 Україна, МПК В02С 13/14. № у 2016 06741; заявл. 21.06.2016; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.

7. Ударно-відцентровий дезінтегратор. : пат. 119892 Україна, МПК В02С 13/14, В02С 19/00. № у 2017 04541; заявл. 10.05.2017; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19.

8. Вібраційний ударно-відцентровий дезінтегратор : пат. 127825 Україна, МПК В02С 13/14, В02С 13/20, В02С 19/00. № у 2018 01878; заявл. 23.02.2018; опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16.

Список джерел у транслітерації

1. Bilenko, L. F. (2012). *Prioritetnye napravleniya povysheniya selektivnosti raskrytiya mineralov v protsesakh podgotovki rudy k obogascheniyu* [Priority directions for increasing the selectivity of mineral disclosure in the processes of ore preparation for enrichment]. *Vestnik NGU «KHP»*. (59), 3–12. [in Ukrainian]

2. Sokur, N. I. Sokur, I. N. Sokur, L. M. (2009). *Tsentrobezhnyye drobilki : monografiya*. Kremenchug : KDPU. [in Ukrainian]

3. Bogdanova, O. S. Olevskogo, V. A. (Ed.). (1982). *Podgotovitelnyye protsesy : Spravochnik po obogascheniyu rud*. M.: Nedra. [in Russian].

4. Sokur, N. I. Poturayev, V. N. Babets, Ye. K. (2000). *Drobleniye i izmelcheniye rud*. Krivoy Rog : VEZNA. [in Ukrainian].

5. Nadutiy, V. P. Loginova, A. A. Sukharev, V. V. (2016). *Effektivnost icpolzovaniya udarnotsentrobezhnogo dezintegratora, realizuyushego sdivgovyye deformatsyi pri razrushenii gornoy massy* [Effectiveness of the use of shock-centrifugal disintegrator implementing shear deformation in rock mass destruction]. *Heotekhnichna mekhanika : Mizhvid. zb. nauk. prats. IGTM NAN Ukrainy*. (131), 26–32. [in Ukrainian].

6. Nadutiy, V. P. Zlborov, K. A., Loginova, A. O. (2017). *Udarno-vidtsentrovyy dezintegrator*. Patent № 116387 Ukraina, МПК В02С 13/14. № у 2016 06741; заявл. 21.06.2016; opubl. 25.05.2017, Bul. № 10.

7. Nadutiy, V. P. Loginova, A. A. Sukharev, V. V. (2017). *Udarno-vidtsentrovyy dezintegrator*. Patent № 119892 Ukraina, МПК В02С 13/14, В02С 19/00. № у 2017 04541; заявл. 10.05.2017; opubl. 10.10.2017, Bul. № 19.

8. Nadutiy, V. P. Loginova, A. A. Sukharev, V. V. (2018). *Udarno-vidtsentrovyy dezintegrator*. Patent № 127825 Ukraina, МПК В02С 13/14, В02С 13/20, В02С 19/00. № у 2018 01878; заявл. 23.02.2018; opubl. 27.08.2018, Bul. № 16.

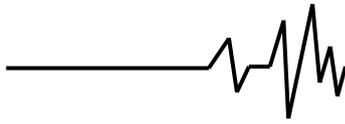
THE RESULTS OF STUDIES OF THE DEPENDENCE OF THE PERFORMANCE OF THE VIBRATING TWO-SHAFT CENTRIFUGAL MODULE ON THE MODE AND DESIGN PARAMETERS

The article presents a new design of a vibrating twin-shaft centrifugal module designed for grinding and classification of rock mass. In this design, in addition to grinding, the operation of classification or screening of the crushed mass was added, which does not allow its regrinding and increases the productivity of the device. This is achieved by installing in the bottom of the chamber grinding mesh with cells in accordance with the required class size. At the same time, the classification process is intensified by the presence of vibration from vibration exciters fixed on the camera body and the installation of the camera on elastic supports. The reciprocating horizontal vibrations of the chamber with a given amplitude and frequency contribute to the segregation of the crushed rock mass in the bed by size, which positively affects the efficiency of classification and grinding. The presence of vibration helps to unload the oversize product from the grinding chamber. Also, the article considers experimental studies performed on a vibrational two-shaft centrifugal module to determine the dependence of the performance of a given design on five variable factors: rotor shaft revolutions (n , rpm), size of the loaded rock mass (Δ , mm), rock mass strength (σ , kg/mm²), camera vibration frequency (ω , rpm) and its vibration amplitude (A , mm). Studies have shown the efficiency and increased productivity of the new design in relation to a centrifugal disintegrator without a classification grid and vibration. The results of the work allow us to recommend the design under study for the manufacture of an experimental sample according to the given initial requirements, and the established dependences ($Q = f(n, \Delta, \sigma, \omega, A)$) make it possible to develop a mathematical model of the grinding process in this setup to calculate the required parameters.

Keywords: *centrifugal disintegrator, classification, vibration, shock, rock mass, productivity.*

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАЛЕЖНО ПРОДУКТИВНОСТІ ВІБРАЦІЙНО ДВОХВАЛЬН ВІДЦЕНТРОВОГО МОДУЛЯ ВІД РЕЖИМНИХ І КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ

У статті представлено нову конструкцію вібраційного двухвального відцентрового модуля, призначеного для подрібнення і класифікації гірської маси. В даній конструкції, крім подрібнення, додалася операція класифікації або відсіву подрібненої маси, що не допускає її переподрібнення і збільшує продуктивність пристрою. Це досягається за рахунок установки в днище камери подрібнення сітки з осередками відповідно до необхідного класом крупності. При цьому процес класифікації інтенсифікується



наявністю вібрації від укріплених на корпусі камери вібробудників і установки камери на пружні опори. Зворотно-поступальні горизонтальні коливання камери з заданими амплітудою і частотою сприяють сегрегації подрібнюваної гірської маси в шарі по крупності, що позитивно позначається на ефективності класифікації і на подрібненні. Наявність вібрації сприяє розвантаженню надRESHITного продукту з камери подрібнення. Також в статті розглянуті виконані на вібраційному двохвальному центробежном модулі експериментальні дослідження по визначенню залежності продуктивності даної конструкції від п'яти варійованих факторів: оборотів валу роторів (n , об/хв), крупності завантажуваної гірської маси (Δ , мм), міцності гірської маси (σ , кг/мм²), частоти коливаний камери (ω , об/хв) і амплітуди її коливаний (A ,

мм). Проведені дослідження показали працездатність і підвищену продуктивність нової конструкції по відношенню до відцентрового дезінтегратори без класифікуючої сітки і вібрації. Результати роботи дозволяють рекомендувати досліджувану конструкцію для виготовлення експериментального зразка за заданими вихідними вимогами, а встановлені залежності ($Q = f(n, \Delta, \sigma, \omega, A)$) дають можливість розробити математичну модель процесу подрібнення в даній установці для розрахунку необхідних параметрів.

Ключові слова: відцентровий дезінтегратор, класифікація, вібрація, удар, гірська маса, продуктивність.

Відомості про авторів

Надутьий Володимир Петрович - завідувач відділу механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, м. Дніпро; доктор технічних наук, професор; 49005, Дніпропетровська область, м. Дніпро, вул. Симферопольська, 2а тел. 0501958382, nadutyvp@gmail.com

Логінова Анастасія Олександрівна - доцент кафедри конструювання, технічної естетики та дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро; кандидат технічних наук; 49005, Дніпропетровська область, м. Дніпро, пр. Яворницького, 17, тел. 0666736969, logan.anlim@gmail.com

Сухарев Віталій Віталійович - старший науковий співробітник відділу механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, м. Дніпро; кандидат технічних наук; 49005, Дніпропетровська область, м. Дніпро, вул. Симферопольська, 2а, тел. 0975016722, agnivik@ukr.net

Надутьий Владимир Петрович - заведующий отделом механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова Национальной академии наук Украины, г. Днепр;

доктор технических наук, профессор 49005, Днепропетровская область, Днепр, ул. Симферопольская, 2а, тел. 0501958382, nadutyvp@gmail.com

Логінова Анастасія Александровна доцент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», г. Днепр; кандидат технічних наук; 49005, Днепропетровская область, г. Днепр, пр. Яворницького, 17, тел. 0666736969, logan.anlim@gmail.com

Сухарев Виталий Витальевич - старший научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова Национальной академии наук Украины, г. Днепр; кандидат технических наук; 49005, Днепропетровская область, г. Днепр, ул. Симферопольская, 2а, тел. 0975016722, agnivik@ukr.net

Naduty Vladimir Petrovich - 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, Dnipro city;

Doctor of Technical Sciences, Professor 49005, Dnipropetrovsk region, Dnipro city, st. Simferopol, 2a, tel. 0501958382, nadutyvp@gmail.com

Loginova Anastasia Alexandrovna - Associate Professor, Department of Design, Technical Aesthetics and Design, National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro city; candidate of technical sciences; 49005, Dnipropetrovsk region, Dnipro city, Yavornytsky ave., 17, tel. 0666736969, logan.anlim@gmail.com

Sukharev Vitaliy Vitalievich - 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, Dnipro city; candidate of technical sciences; 49005, Dnipropetrovsk region, Dnipro city, st. Simferopol, 2a, tel. 0975016722, agnivik@ukr.net