

Надуть В.П.
д. т. н., професор

Чельшкіна В.В.
к.т.н., ст. наук. спів.

Сухарев В.В.
к.т.н., ст. наук. спів.

**Институт
геотехнической механики
им. М.С. Полякова
Национальной академии
наук Украины**

Маланчук З.Р.
д. т. н., професор

**Национальный
университет водного
хозяйства и
природопользования
МОН Украины**

**Nadutyu V.
Cholishkina V.
Sukharev V.**

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

Malanchuk Z.

**National University of Water
Management and Nature
Management of the Ministry of
Education and Science of
Ukraine**

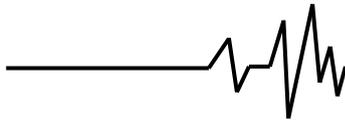
УДК 532.5.011: 622.33: 622.752.3
DOI: 10.37128/2306-8744-2019-3-2

ПОДГОТОВКА ТУФА В ОТВАЛАХ БАЗАЛЬТОВЫХ КАРЬЕРОВ К ВИБРАЦИОННОМУ ГРОХОЧЕНИЮ

В статье представлена актуальная разработка комплексной технологии переработки туфа в отвалах базальтовых карьеров для выделения ценной металлургической фракции и силикатной масс. С целью подготовки туфа к переработке предложено использовать эффект влагопоглощения и снижения прочности туфа при увлажнении водой, поскольку он имеет пористую структуру и относительно легко впитывает влагу. Эта операция с последующим вибрационным грохочением по мелкому классу - 2,5+2,0 мм перспективна для селективного извлечения туфа из отвалов базальтовых карьеров, где, в отличие от остальных пород, туф является водопоглощающим минералом. В статье изложены результаты экспериментальных исследований и разработки математических моделей процесса разупрочнения туфа водой. Задачей исследований являлось определить степень изменения прочности туфа под влиянием влаги и установить зависимости влажности и прочности для прогноза процесса разупрочнения туфа при увлажнении. Экспериментальные исследования были проведены на различных образцах туфов Рафаловского базальтового карьера, при этом фиксировалось время выдержки образца в воде, определялась влажность, сила вдавливания индентора на прессе или контактная нагрузка и прочность на сжатие или контактное напряжение при внедрении индентора. Установлено, что при увлажнении туфа в течение суток влажность повышается в среднем на 9 %, прочность снижается от 120,5 до 10,6 МПа и составляет 9,2 % от прочности исходного сырья. Влажность туфа во времени возрастает по закону квадратичной параболы со сложным аргументом, сила вдавливания индентора от влажности и времени увлажнения изменяется по логарифмическому закону, прочность от влажности и времени - по закону квадратичной параболы. Также в статье предложен алгоритм расчета влажности и прочностных характеристик при увлажнении в течение суток. Данную технологию разупрочнения туфа водой целесообразно использовать в качестве операции рудоподготовки при комплексной технологии переработки туфа.

Ключевые слова: туф, рудоподготовка, влажность, прочность, математические модели

Запасы туфов на территории глубине. В рамках базальтовых карьеров Украинского Полесья огромны, они Ровенщины туфы выходят на поверхность, по простираются в виде полос на небольшой



приблизительной оценке здесь их запасы достигают 20 млн. т [1].

Многими исследованиями установлено наличие в туфах самородной и вкрапленной меди, титана, железа, кобальта. Так, содержание меди, в туфах Рафаловского карьера составляет 0,4 - 0,7 %, карьера Иванова долина 0,6 - 1,0%. Туфы имеют ярко выраженные магнитные свойства, содержание железа составляет до 50 %, титана - до 4,0 % [1, 2]. Однако сегодня туф добывают лишь в небольших количествах для нужд сельского хозяйства, животноводства, медицины, строительства благодаря уникальным агрохимическим, биоактивным и сорбентным свойствам [3]. Учитывая богатый вещественный и минеральный состав туфов, актуальна разработка комплексной технологии переработки туфа для выделения ценной металлической фракции и силикатной массы [2].

В первую очередь внимание привлекают большие запасы туфа, скопившиеся в отвалах базальтовых карьеров за десятилетия их эксплуатации. Слой туфа под базальтовым массивом имеет толщину до 15 м. Наличие подъездных путей и горнодобывающей инфраструктуры на карьерах значительно удешевляет добычу и переработку туфов.

В отвалах базальтовых карьеров туф является водопоглощающим минералом, в отличие от остальных пород – базальта, лавобрекчии, кварца. Он имеет пористую структуру и относительно легко впитывает влагу. Следует полагать, что под действием влаги туф будет менять прочностные свойства. Натурные наблюдения указывали на снижение кусковатости туфа в отвалах после дождей и на дне карьера в местах скопления грунтовых вод.

Процесс разупрочнения туфа водой может служить одним из способов

рудоподготовки или предобогащения. Например, он дает возможность осуществлять селективную выемку туфа из карьерных отвалов путем увлажнения и последующего вибрационного грохочения по мелкому классу - 2,5+2,0 мм. Для этого, скорее всего, целесообразно использовать валковые вибрационные классификаторы, например, оснащенные лепестковыми насадками, которые оказывают ударное воздействие при интенсивном перемешивании материала [4]. Технология рудоподготовки, включающая разупрочнение туфа путем увлажнения и последующее вибрационное грохочение, представляется перспективной и требует изучения в части количественной оценки и аналитического описания процессов.

Задачей исследований являлось определить степень изменения прочности туфа под влиянием влаги и установить зависимости влажности и прочности для прогноза процесса разупрочнения туфа при увлажнении.

Экспериментальные исследования были проведены на 10 образцах туфов Рафаловского базальтового карьера. Фиксировалось время выдержки образца в воде T , определялась влажность W , сила вдавливания индентора на прессе или контактная нагрузка P , (кгс) и прочность на сжатие или контактное напряжение при внедрении индентора σ (МПа) [5]. Начальной являлась влажность туфа после пребывания образцов на воздухе в течение 14 дней при температуре 20 °С, в расчетах ее задавали равной 0,2 %. Текущую влажность в процессе увлажнения определяли путем взвешивания. Полученная база экспериментальных данных подвергалась математической обработке с целью установить следующие зависимости процесса разупрочнения туфа:

$$P = f(T), P = f(W), W = f(T), \sigma = f(W), \sigma = f(T)$$

Установлено, что основное снижение усилия вдавливания происходит

в течение первых суток увлажнения туфа (рис. 1).

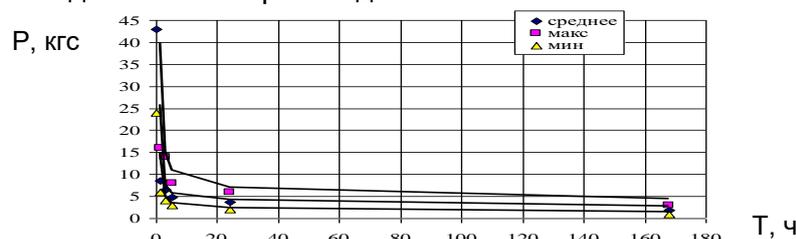
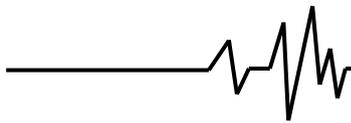


Рис. 1. Зависимость силы вдавливания индентора P от времени увлажнения



В среднем для 10 образцов усилие вдавливания снижается за 1,5 ч на 80 %, за сутки – на 91 %, за 7 суток – на 95,6 %. То же касается и прочности, как производной функции усилия вдавливания. Исходя из этого, далее рассматривалось увлажнение туфа в течение первых суток. Для аппроксимации зависимостей в работе использовалась программа Microsoft Excel.

Получить зависимость $P = f(T)$ оказалось затруднительно из-за неопределенности при $T = 0$ (рис.1). Поэтому вначале определяли функцию $P = f(W)$, затем $W = f(T)$ и W подставляли в $P = f(W)$. Зависимости $P = f(W)$ показаны на рис. 2.

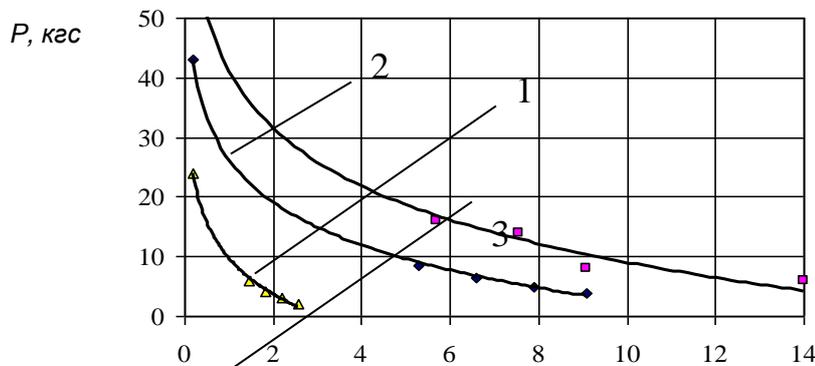


Рис. 2. Зависимость силы вдавливания индентора P от влажности туфа W

1 – среднее для 10 проб; 2 – максимальное, образец 7; 3 – минимальное, образец 5

Для средних показателей математическая модель силы вдавливания индентора от влажности с высокой адекватностью, в оценке по квадрату

коэффициента корреляции R^2 , имеет логарифмический характер:

$$P = f(W) = 26,25 - 10,36 \cdot \ln(W), R^2 = 0,9997 \quad (1)$$

Для определения функции $W = f(T)$ вместо времени T использовали приведенную переменную, $\ln(T + 1)$ (рис.3).

Аппроксимация зависимости рис. 3 показывает, что влажность туфа от времени возрастает по закону квадратичной параболы, аргумент которой имеет вид: $\ln(T+1)$

$$W = f(T) = 0,278 + 6,16 \cdot \ln(T + 1) - 1,062 \cdot (\ln(T + 1))^2, R^2 = 0,997 \quad (2)$$

или

$W, \%$

$$W = (-1,062) \cdot (A - 2,9)^2 + 9,21, \text{ где } A = \ln(T + 1)$$

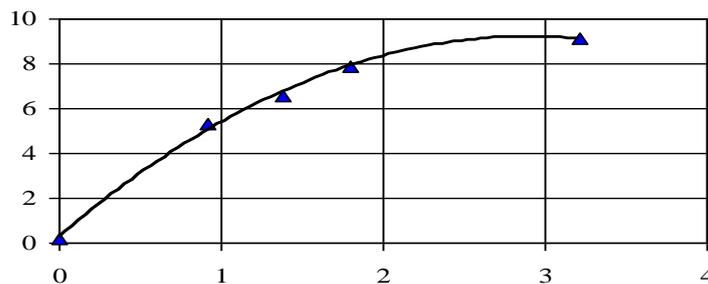
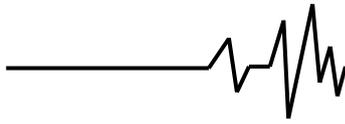


Рис. 3. Зависимость средней влажности от приведенного времени увлажнения

$\ln(T+1)$



Подставив уравнение (2) в (1), после преобразований получим, что зависимость силы вдавливания индентора от времени увлажнения подчиняется логарифмическому

закону, где аргумент является сложным выражением:

$$P = f(T) = 26,25 - 10,26 \cdot \ln[(-1,062) \cdot [\ln(T + 1) - 2,9]^2 + 9,21] \quad (3)$$

или $P = 26,25 - 10,36 \cdot \ln[9 - 1,062) \cdot (A - 2,9)^2 + 9,21]$, где $A = \ln(T + 1)$

Приемлемая адекватность зависимости (3) подтверждается высокими значениями R^2 уравнений (1) и (2).

Эксперименты показали, что для 10 образцов туфа, до увлажнения прочность меняется в пределах 67,18÷179,36 МПа и в среднем составляет 120 МПа. При увлажнении в течение суток в среднем влажность туфа повышается на 9,1 %, прочность снижается с 120,5 МПа до 10,6 МПа, что составляет 9,2 % от прочности исходного

материала. Наиболее малое снижение прочности составило 6,2 % от исходной (образец № 8), при этом его влажность возросла на 7,4 %. Зависимости прочности туфа от влажности $\sigma = f(W)$ показаны на рис. 4.

Зависимость средней прочности туфа от средней влажности представляет собой квадратичную параболу:

$$\sigma = f(W) = 1,57W^2 - 26,92W + 125,5 \quad (4)$$

Построение зависимости $\sigma = f(T)$, также как и ранее $P = f(T)$, потребовало введения приведенной переменной и вычисления

с использованием функции $W = f(T)$. Для этого в уравнение (7) подставим (2) и после преобразований получим:

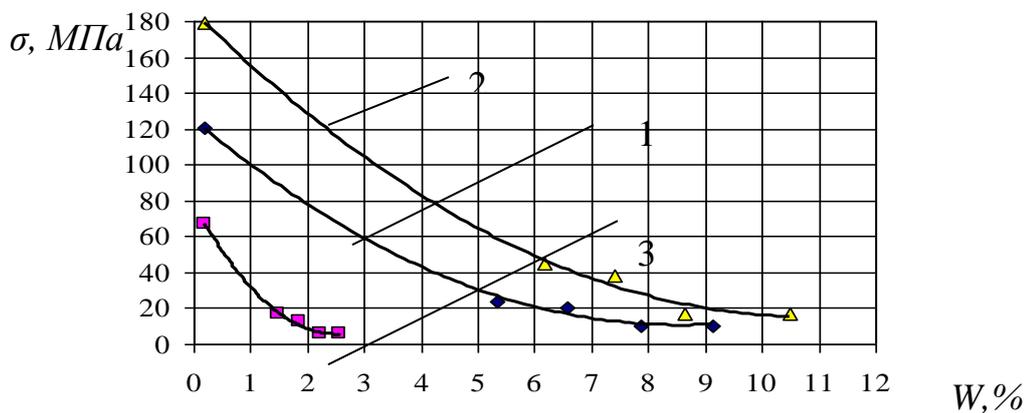


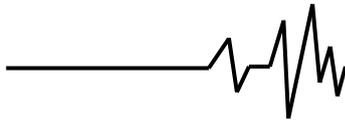
Рис. 4 – Зависимости прочности от влажности туфа
1 – среднее для 10 проб; 2 – максимальное, образец 8;
3 – минимальное, образец 6

$$\sigma = f(T) = 1,776 \cdot (\ln(T + 1) - 2,9)^4 - 2,223 (\ln(T + 1) - 2,9)^2 + 11,258 \quad (5)$$

или $\sigma = 1,776 \cdot B^2 - 2,23 \cdot B + 11,26$ где $B = (\ln(T + 1) - 2,9)^2$

Уравнение (5) показывает, что зависимость прочности от времени увлажнения подчиняется параболическому закону со

степенью четыре, либо она может быть описана квадратичной параболой, где аргумент является сложной функции времени.



Таким образом, при увлажнении туфа в пределах до 24 часов, повышение влажности описывает уравнение (2), разупрочнение от влажности – уравнения (1), (4), от времени увлажнения – уравнения (3), (5).

$$\begin{aligned} A &= \ln(T + 1) \\ W &= (-1,062) \cdot (A - 2,9)^2 + 9,21 \\ P &= f(W) = 26,25 - 1036 \cdot \ln(W) \\ \sigma &= f(W) = 1,57W^2 - 26,92W + 125,5, \end{aligned} \quad (6)$$

где T – время увлажнения, ч; W – влажность, %; P – сила вдавливания индентора, кгс; σ – прочность туфа, МПа. Начальное условие: $T = 0$, $W = 0,2\%$. Средняя относительная ошибка расчета составляет $W - 1,6\%$, $P - 6,53\%$, $\sigma - 10,9\%$, что приемлемо для практического использования.

Выводы. Установлено, что при увлажнении туфа в течение суток влажность повышается в среднем на 9 %, прочность снижается от 120,5 до 10,6 МПа и составляет 9,2 % от прочности исходного сырья. Влажность туфа во времени возрастает по закону квадратичной параболы со сложным аргументом, сила вдавливания индентора от влажности и времени увлажнения изменяется по логарифмическому закону, прочность от влажности и времени - по закону квадратичной параболы. Представлен алгоритм расчета влажности и прочности туфа при увлажнении. Технологию разупрочнения туфа водой целесообразно использовать в качестве операции рудоподготовки при переработке туфового сырья.

Список використаних джерел

1. Основні фізико-хімічні та технологічні властивості туфів Рівненщини / З. Р. Маланчук та ін. *Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. пр.* Дніпропетровськ : ІГТМ НАН України. 2005. Вип. 59. С. 106–114.

2. Надутый В. П., Маланчук З. Р., Прокопюк О. Н. Обоснование необходимости комплексной переработки цеолит-сметитовых туфов Волыни "Форум горняков-2010": матер. *Международ. конф.* Днепропетровск: НГУ, 2010. С. 50–55.

3. Природний мінерал – базальтовий туф, перспективи застосування в харчовій промисловості, біології та медицині / І. П. Бурденюк та ін. *Клін. та експерим. патол.* 2013. Т. XII. № 2 (44). С. 35–41.

4. Надутый В. П., Ягнюков В. Ф., Ягнюкова И. В. Результаты экспериментальных исследований валкового вибрационного классификатора в зависимости от его

Для практического использования рекомендован алгоритм расчета показателей разупрочнения туфа водой, который состоит в последовательном решении уравнений:

конструктивных параметров. *Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. пр.* Дніпро: ІГТМ НАН України, 2016. Вип. 126. С. 15–25.

5. The official site «Single window of access to information resources» (2019), "Method of determining the strength of rocks", available at: <http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/116/71116/48332>.

Список джерел у транслітерації

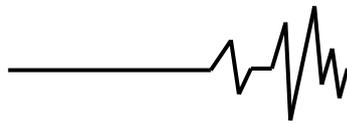
1. Malanchuk, Z. R. (2005). Osnovni fizyko-khimichni ta tekhnolohichni vlastyvoli tufiv Rivnenshchiny [Basic physicochemical and technological properties of tufts of Rivne region]. *Heotekhnichna mekhanika : Mizvid. zb. nauk. prats. IHTM NAN Ukrayiny.* (59), 106-114. [in Ukrainian].

2. Naduty, V.P. Malanchuk, Z. R. Prokopyuk, O. N. (2010). Obosnovanie neobkhodimosti kompleksnoy pererabotki tseolit-smektitovykh tufov Volyni [Justification of the need for complex processing of zeolite-smectite tufts of Volyn]. "Forum gornyakov-2010" : mater. Mezhdunar. konf. 50-55. [in Ukrainian].

3. Burdeniuk, I. P. (2013). Pryrodnyi mineral - bazaltovyi tuf, perspektyvy zastosuvannia v kharchoviy promyslovosti, biolohii ta medytsyni [Natural mineral - basalt tuff, prospects of application in food industry, biology and medicine]. *Klinichna ta eksperymentalna patolohiia.* XII. (2(44)). 35–41. [in Ukrainian].

4. Nadutyiy, V. P. Yagnyukov, V.F. Yagnyukova I.V. (2016). Rezultaty eksperymentalnykh issledovaniy valkovogo vibratsionnogo klassifikatora v zabisimosti ot ego konstruktivnykh parametrov [The results of experimental studies of the roll vibration classifier depending on its design parameters]. *Heotekhnichna mekhanika : Mizvid. zb. nauk. prats. IHTM NAN Ukrayiny.* (126), 15-25. [in Ukrainian].

5. The official site «Single window of access to information resources» (2019), "Method of determining the strength of rocks", available at: <http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/116/71116/48332> [in Russian].

**PREPARATION OF TUFF IN THE DUMPS OF
BASALT QUARRIES
FOR VIBRATION SCREENING**

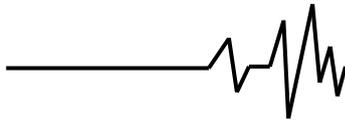
The article presents the current development of an integrated technology for the processing of tuff in the dumps of basalt pits to highlight the valuable metal fraction and silicate masses. In order to prepare tuff for processing, it is proposed to use the effect of moisture absorption and reduce the strength of tuff when moistened with water, since it has a porous structure and is relatively easy to absorb moisture. This operation, followed by vibratory screening in a small class of $-2.5 + 2.0$ mm, is promising for the selective extraction of tuff from dumps of basalt quarries, where, unlike other rocks, tuff is a water-absorbing mineral. The article presents the results of experimental studies and the development of mathematical models of the process of softening tuff with water. The objective of the research was to determine the degree of change in the strength of tuff under the influence of moisture and to establish the dependence of humidity and strength to predict the process of softening of tuff when wet. Experimental studies were carried out on various samples of tuffs of the Rafalovsky basalt quarry, while the exposure time of the sample in water was recorded, humidity, indenter indentation pressure on the press or contact load and compressive strength or contact stress during indenter penetration were determined. It was found that when moistening tuff during the day, humidity increases on average by 9%, strength decreases from 120.5 to 10.6 MPa and is 9.2% of the strength of the feedstock. Humidity of tuff in time increases according to the law of a quadratic parabola with a complex argument, the force of indentation of the indenter from moisture and wetting time changes according to the logarithmic law, strength from humidity and time - according to the law of the quadratic parabola. Also, the article proposes an algorithm for calculating humidity and strength characteristics during wetting during the day. It is advisable to use this technology of softening tuff with water as an ore preparation operation with the integrated technology of tuff processing.

Keywords: *tuff, ore preparation, moisture, strength, mathematical models*

**ПІДГОТОВКА ТУФУ У ВІДВАЛАХ
БАЗАЛЬТОВИХ КАР'ЄРІВ
ДО ВІБРАЦІЙНОГО ПРОСІВАННЯ**

У статті представлена актуальна розробка комплексної технології переробки туфу в відвалах базальтових кар'єрів для виділення цінної металевої фракції і силікатної маси. З метою підготовки туфу до переробки запропоновано використовувати ефект вологопоглинання і зниження міцності туфу при зволоженні водою, оскільки він має пористу структуру і відносно легко вбирає вологу. Ця операція з подальшим вібраційним грохоченням по дрібному класу $-2,5 + 2,0$ мм перспективна для селективного вилучення туфу з відвалів базальтових кар'єрів, де, на відміну від інших порід, туф є водовбирним мінералом. У статті викладені результати експериментальних досліджень і розробки математичних моделей процесу розміцнення туфу водою. Завданням досліджень було визначити ступінь зміни міцності туфу під впливом вологи і встановити залежності вологості і міцності для прогнозу процесу розміцнення туфу при зволоженні. Експериментальні дослідження були проведені на різних зразках туфів Рафаловського базальтового кар'єра, при цьому фіксувався час витримки зразка в воді, визначалася вологість, сила вдавлювання індентора на пресі або контактне навантаження і міцність на стиск або контактне напруження при вдавлюванні індентора. Встановлено, що при зволоженні туфу протягом доби вологість підвищується в середньому на 9%, міцність знижується від 120,5 до 10,6 МПа і становить 9,2% від міцності вихідної сировини. Вологість туфу в часі зростає за законом квадратичної параболи зі складним аргументом, сила вдавлювання індентора від вологості і часу зволоження змінюється за логарифмічною законом, міцність від вологості і часу - за законом квадратичної параболи. Також в статті запропоновано алгоритм розрахунку вологості і міцності при зволоженні протягом доби. Дану технологію розміцнення туфу водою доцільно використовувати в якості операції рудопідготовки при комплексній технології переробки туфу.

Ключові слова: *туф, рудопідготовка, вологість, міцність, математичні моделі*

**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. Сімферопольська, 2а, тел. 0501958382, nadutyvp@gmail.com

Чолишкіна Валентина Василівна - 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. Сімферопольська, 2а тел. 0957816233, chel.valenti@gmail.com

Сухарєв 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. Сімферопольська, 2а, тел. 0975016722, agnivik@ukr.net

Маланчук Зіновій Романович - професор кафедри розробки родовищ і видобутку корисних копалин, Національний університет водного господарства і природокористування МОН України, м. Рівне доктор технічних наук, професор; 33028, Рівненська область, м. Рівне, вул. Соборна, 11 тел. 0507774231, malanchykzr@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

Чолишкіна Валентина Васильєвна - 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, Днепр, ул. Симферопольская, 2а, тел. 0957816233, chel.valenti@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

Маланчук Зиновий Романович - профессор кафедры разработки месторождений и добычи полезных ископаемых, Национальный университет водного хозяйства и природопользования МОН Украины, г. Ровно; доктор технических наук, профессор; 33028, Ровенская область, г. Ровно, ул. Соборная, 11 тел. 0507774231, malanchykzr@ukr.net

Naduty Vladimир Petrovich - Head of the Department of Mechanics of Machines and Processes of Mineral Processing, Institute of Geotechnical Mechanics named M.S. Poljakov 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

Cholishkina Valentina Vasilievna - 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. 0957816233, chel.valenti@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

Malanchuk Zinovy Romanovich - Professor, Department of Field Development and Mining, National University of Water Management and Nature Management of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Rivne city; Doctor of Technical Sciences, Professor; 33028, Rivne region, Rivne city, st. Cathedral, 11 tel. 0507774231, malanchykzr@ukr.net