

УДК 532.5.011: 622.33: 622.752.3

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА РАЗУПРОЧНЕНИЯ ТУФА ПРИ УВЛАЖНЕНИИ**¹Надутый В.П., ¹Чельшкіна В.В.**¹*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины***РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ЗНЕМІЦНЕННЯ ТУФУ ПРИ ЗВОЛОЖЕННІ****¹Надутый В.П., ¹Чолишкіна В.В.**¹*Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України***DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF PROCESS OF THE TUFF SOFTENING AT ITS WATERING****¹Nadutyu V.P., ¹Chelyshkina V.V.**¹*Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine*

Аннотация. Сегодня туфы добывают в малых объемах, но область их применения весьма широка. Базальтовые цеолит-сметитовые туфы Ровненско-Волынского региона являются ценным сырьем, содержащим калийно-магниевые соли, медь, железо, титан, кобальт. В ИГТМ НАН Украины разрабатывается комплексная безотходная технология извлечения из туфа металлической фракции, при этом отходы предлагается использовать в традиционных для туфа областях - сельском хозяйстве, строительстве, медицине, биологии. В статье изложены результаты исследований способа подготовки сырья к переработке путем разупрочнения туфа за счет насыщения водой. На базе экспериментальных исследований влагопоглощения и прочностных характеристик разработаны математические модели для прогноза процесса разупрочнения туфа. Установлено, что при насыщении водой в течение 7 суток влажность туфа возрастает в среднем на 11,4 %, максимум до 15%, прочность снижается со 120,5 до 5,02 МПа, что составляет 4 - 5% от прочности исходного сырья. Основное изменение показателей происходит в первые сутки увлажнения. Математическая модель увеличения влажности от времени увлажнения представляет собой квадратичную параболу, аргумент которой является сложной функцией. Аналитические зависимости снижения прочности и силы вдавливания индентора от влажности и времени в общем виде носят логарифмический характер. Предложен алгоритм расчета влажности и прочностных показателей. Процесс рудоподготовки туфа путем увлажнения перспективен при добыче туфов, как из обычных, так и техногенных месторождений. Расход воды составляет 10-12% от массы породы. При этом учитывается, что например, в отвалах базальтовых карьеров, в отличие от туфа, остальные породы – базальт, кварц, лавобрекчия, практически не поглощают воду. За счет этого существенно разупрочняется туфовая масса в отличие от остальных пород. Это создает условия для селективной выемки туфа из отвалов карьеров, например, путем вибрационного грохочения по мелкому классу (-2,5 + 2,0 мм), при необходимости, с предварительным дроблением в валковой дробилке.

Ключевые слова: математическая модель, разупрочнение туфа, увлажнение, рудоподготовка.

Вулканические цеолит-сметитовые туфы приурочены к западному склону Украинского кристаллического щита, зачастую они являются сопутствующей породой базальтовых месторождений Волынской и Ровенской области. На отвалах базальтовых карьерах скопилось до 20 млн тонн туфов в виде отходов производства, туфы в подошве базальтов имеют толщину до 15 м [1, 2].

Сегодня туфы добывают в малых объемах, но область их применения весьма широка. Так, учитывая высокое содержание калийно-магниевых солей, K_2O – до 7,5 %, MgO – до 16 %, N_2O – до 7,5 %, его используют в сельском хозяйстве в виде туфовой муки как удобрение, для подкормки птиц и животных, при хранении зерна.

Также туф используют в медицине, химии, строительстве и других отраслях в качестве связующего, теплоизолятора, сорбента для токсичных веществ и радиоактивных отходов [2, 4, 5].

Особый интерес туфы вызывают в связи с наличием самородной меди и рассеянными вкраплениями медьсодержащих минералов, а также высокими магнитными свойствами.

Так, содержание меди составляет до 0,7-1,0%, железа - до 50 %, титана - до 4,0 % [1- 3].

Поэтому актуальна разработка комплексной безотходной технологии переработки туфов для извлечения ценных металлических компонентов и использования отходов в традиционных для туфа областях.

По данным карьерных разработок получено, что при относительно высокой пористости, до 20-43%, туфы чувствительны к влиянию влаги, однако количественной оценке этого явления уделено недостаточно внимания. Анализ показал, что туфы впитывают в среднем 12 % воды по отношению к весу сухого образца. При этом происходит их интенсивное разупрочнение за счет ослабления цементирующих связей цеолитов и смектитов. Наиболее интенсивно оно происходит в первые 1,5÷2,0 часа пребывания образца в воде, а в течение недели увлажнения образцы разупрочняются настолько, что начинают терять форму, при этом возрастает кусковатость породы.

Явление снижения прочности туфов под действием воды может являться одним из способов подготовки сырья к переработке и обогащению, что потребовало изучения этого процесса.

Целью работы являлось экспериментально оценить влагопоглощение и прочностные показатели туфа и определить зависимости их изменения для прогноза показателей разупрочнения сырья при рудоподготовке путем увлажнения.

Эксперименты выполнялись на образцах туфов Рафаловского базальтового карьера в виде кернов добытых на глубине 2 ÷10 м. Определялся начальный вес образцов M , сила P вдавливания индентора на прессе (острие индентора имело площадь 1,0 мм²), величина напряжения σ или прочность на сжатие по известной методике [6]. Далее фиксировалось время выдержки образцов в воде, и определялись эти же параметры для каждого значения времени (табл. 1).

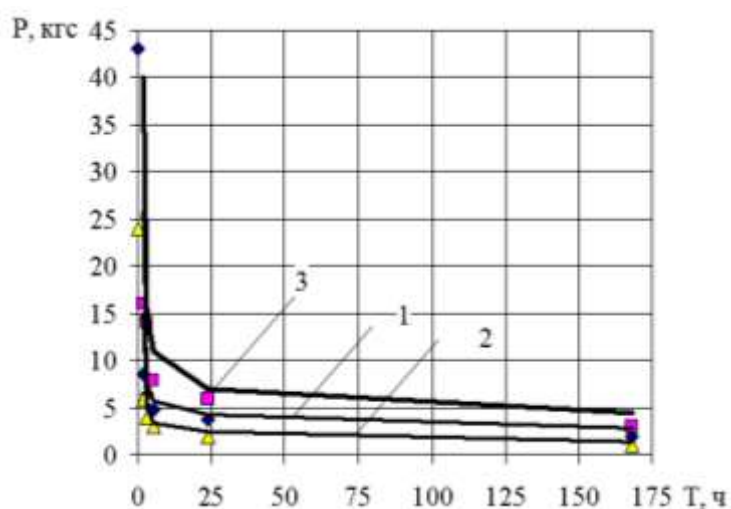
Из табл.1 видно, что основное изменение показателей происходит в первые сутки увлажнения, когда в среднем влажность возрастает на 9,1%, отдельных образцов на 15 %, прочность снижается со 120,5 до 10,6 МПа, в 11,4 раз. За 6 последующих суток увлажнения дополнительно прочность снижается с 10,6 до 5,0 МПа, влажность возрастает на 2,3%, с 9,1 до 11,4%.

Характер зависимостей рис.1 выраженный нелинейный. Так увлажнение в течение 1,5 часов приводит к снижению силы вдавливания в 43/8,6 = 5 раз, за сутки - в 11 раз, с 43 до 3,8 кгс, за последующие 6 суток - лишь с 3,8 до 1,9 кгс.

Установить аналитическую зависимость $P = f(T)$ затруднительно из-за неопределенности функции при $T = 0$. Для этого были опробованы различные приведенные переменные, в том числе, комбинации обратных функций, их

Таблиця 1 – Показатели влажности и прочности для 10 проб туфа

T, ч	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Влажность W, %											
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,5	4,4	5,8	5,0	5,7	1,5	6,6	6,2	6,4	6,0	5,7	5,3
3	5,1	7,7	6,9	7,4	1,8	8,0	7,4	6,7	7,1	7,6	6,6
5	6,6	8,9	8,8	7,4	2,2	8,3	8,6	6,9	11,7	9,1	7,9
24	7,4	9,7	10,7	9,0	2,6	8,6	10,5	7,4	11,4	14,0	9,1
168	8,1	11,2	12,6	10,0	11,0	10,8	11,1	11,6	12,8	15,2	11,4
Сила вдавливания P, кгс											
0	60	50	40	24	24	40	64	48	40	40	43,0
1,5	8	8	8	6	6	8	16	8	12	6	8,6
3	6	6	6	5	4	6	14	6	8	4	6,5
5	5	5	5	4	3	5	8	5	6	3	4,9
24	4	4	4	4	2	4	6	3	4	3	3,8
168	2	2	2	2	1	2	3	1,5	2	1,5	1,9
Прочность, МПа											
0	168,1	140,1	112,1	67,2	67,2	112,1	179,4	134,4	112,1	112,1	120,5
1,5	22,4	22,4	22,4	16,7	16,7	22,4	44,8	22,4	33,6	16,7	24,0
3	19,6	19,6	20,9	12,7	12,7	19,6	38,2	20,6	28,4	12,7	20,5
5	11,2	11,2	11,2	11,2	5,6	11,2	16,7	8,3	11,2	8,3	10,6
24	11,2	11,2	11,2	11,2	5,6	11,2	16,7	8,3	11,2	8,3	10,6
168	5,30	5,30	5,30	5,30	2,49	5,30	8,11	3,89	5,30	3,89	5,0



1- среднее для 10 проб; 2- минимальное, образец №5; 3 – максимальное, образец № 7

Рисунок 1 – Зависимости силы вдавливания от времени выдержки в воде

логарифмов, но это не дало приемлемого результата поскольку при $T=0$ было высоким расхождение расчетных и опытных значений, до 48%. Поэтому было принято решение вначале установить зависимость влажности от времени $W = f(T)$ и затем использовать ее для определения P и σ , вначале их зависимости от влажности, затем – от времени. Заранее отметим, что такой подход дал положительный результат, позволил существенно снизить ошибку расчета по сравнению с экспериментом.

1 Определение зависимости влажности туфа от времени увлажнения

Для определения аналитической зависимости средней влажности от времени увлажнения используем приведенную переменную $\ln(T+1)$. Очевидно, что любой материал не может иметь нулевую начальную влажность, поэтому зададим начальное условие: при $T = 0$, $W_0 = 0,1\%$. Отметим, что можно, в принципе, задать любое значение влажности в диапазоне $W_0 \in [0, \dots]$, от этого в нижеследующих расчетах лишь изменится численное значение коэффициентов, но не характер зависимостей. Также отметим, что в опытах определяется именно прирост влажности Δ относительно начальной, не зависимо от того какой она была вначале. Все образцы туфов перед началом экспериментов в течение 14 дней выдерживались на воздухе при температуре 24° . Зависимость влажности от приведенной переменной T приведена на рис.2 Достоверность аппроксимации этой и нижеследующих зависимостей оценивалась по величине квадрата коэффициента корреляции R^2 .

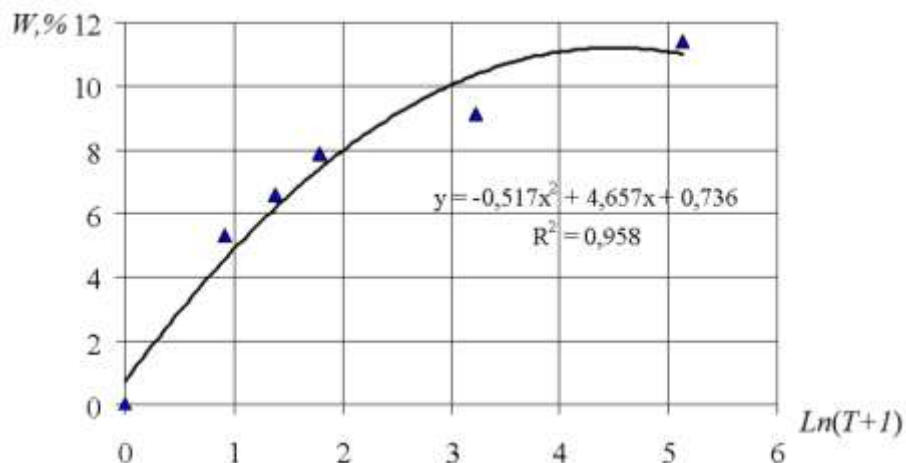


Рисунок 2 – Зависимость средней влажности от приведенного времени увлажнения

Используя возможности программы Microsoft Excel, получим, что аппроксимирующая функция зависимости $W = f(\ln(T+1))$ с высокой достоверностью - $R^2 = 0,958$, имеет параболический характер:

$$W = 0,736 + 4,657 * \ln(T+1) - 0,517 * (\ln(T+1))^2, \quad R^2 = 0,958 \quad (1)$$

То есть влажность туфа от времени возрастает по закону квадратичной параболы, аргумент которой имеет вид $\ln(T+1)$.

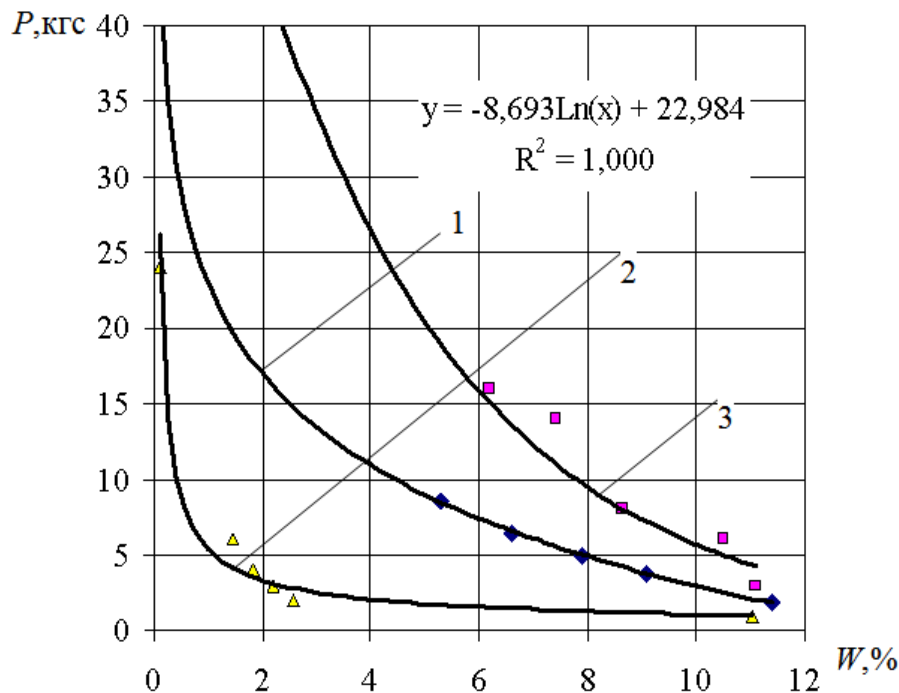
Введем параметр $A = \ln(T+1)$ и запишем (1) в более компактном виде:

$$W = (-0,517) * (A - 4,5)^2 + 11,223, \quad A = \ln(T+1), T \geq 0 \quad (2)$$

Уравнение (2) тоже имеет достаточную степень аппроксимации, так как его коэффициенты приняты с точностью до 3 знака включительно, а исходное уравнение (1) имеет высокое значение R^2 . Таким образом, уравнения (1) или (2) описывают изменение влажности во времени, то есть прирост влажности туфа относительно исходной при начальном условии $T = 0$, $W_0 = 0,1\%$.

2. Зависимости усилия вдавливания индентора от влажности и времени

Зависимости силы вдавливания от влажности приведены на рис.3.



1 – среднее для 10 проб; 2 – максимальное, образец № 7; 3 – минимальное, образец №5

Рисунок 3 – Зависимость силы вдавливания P от влажности W

Аппроксимация функции $P(W)$ для среднего значения P (зависимость 1 рис.3) выполнена исходя из достижения максимально высокого R^2 . Получено, что математическая модель зависимости силы вдавливания индентора от влажности образца с высокой точностью имеет логарифмический характер:

$$P = 22,984 - 8,693 \ln W, \quad R^2 = 0,1 \quad (3)$$

Получим зависимость усилия вдавливания от времени увлажнения $P = f(T)$, для этого подставим в уравнение (3) уравнение (1):

$$P = 26,25 - 10,36 * \ln [0,736 + 4,657 * \ln(T+1) - 0,517 * (\ln(T+1))^2] \quad (4)$$

Используя параметр A , запишем уравнение (4) как:

$$P = 22,984 - 8,693 * \ln[(-0,517) * (A - 4,5)^2 + 11,223], \quad A = \ln(T+1) \quad (5)$$

Из уравнений (4), (5) следует, что математическая модель силы вдавливания от времени увлажнения - зависимостей, приведенных на рис 1 - подчиняется логарифмическому закону, где аргумент является сложным выражением (квадратичной функцией от логарифмической функции времени). Приемлемая адекватность этого закона подтверждается тем, что уравнения (4), (5) получены на основании уравнений (1) и (3), имеющих высокие значения R^2 .

3 Зависимость прочности туфа от влажности и от времени увлажнения

Модель для определения σ - контактной прочности туфа в зависимости от влажности и времени выдержки в воде разработана по данным табл.1.

Из табл.1 видно, что прочность туфа до увлажнения меняется в пределах 67,18 ÷ 179,36 МПа, в среднем составляет 120 МПа. Это довольно высокое значение. В литературных источниках приводится σ туфа до 60 - 80 МПа, но одновременно указывается, что прочность некоторых видов туфов может достигать прочности мрамора - 95-200 МПа [7].

Относительно высокая начальная прочность исследуемых туфов Рафаловского базальтового карьера может объясняться спецификой его вещественного состава и структуры. Так, при относительно высокой пористости, в состав туфа, как правило, входит цементированный обломочный материал, которым, чаще всего является базальт, имеющий высокую прочность – 90-460 МПа [7]. Кроме того, наличие в туфах тяжелых металлов - железа, титана, меди, кобальта, тоже может сказываться на величине прочности.

Из табл.1 видно, что при увлажнении туфа в течение 7 суток в среднем его влажность возрастает на 11,4 %, при этом прочность за счет нарушения цементирующих связей снижается со 120,5 до 5,02 МПа - в 24 раза, причем за первые сутки увлажнения в 11,4 раз, со 120,5 до 10,6 МПа,.

Процент снижения прочности относительно исходной иллюстрирует табл.2, из которой видно, что за первые сутки увлажнения прочность снижается до 9,2 % от исходной, за последующие 6 суток - дополнительно еще на 5%, до 4,4% от прочности исходного материала.

Таблица 2 – Снижение прочности в % для 10 образцов туфа

$T, \text{ч.}$	$W_{\text{ср}}, \%$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\sigma_{\text{ср}}, \%$
0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1,5	5,3	13,3	16,0	19,9	24,8	24,8	19,9	25,0	16,6	30,0	14,9	20,5
3	6,6	11,7	14,0	18,4	19,0	19,0	17,5	21,3	15,3	25,4	11,4	17,3
5	7,9	6,7	8,0	10,0	16,6	8,3	10,0	9,3	6,2	10,0	7,4	9,2
24	9,1	6,7	8,0	10,0	16,6	8,3	10,0	9,3	6,2	10,0	7,4	9,2
168	11,4	3,2	3,8	4,7	7,9	3,7	4,7	4,5	2,9	4,7	3,5	4,4

Наибольшее снижение прочности составляет примерно 3% от исходной. Это наблюдается для образцов 1 и 8 (табл.2). Влажность этих образцов составила 8,1 и 11,6 %, соответственно (табл.1), то есть в среднем увеличилась на 10%.

Получено, что между силой вдавливания индентора P и прочностью на сжатие σ существует весьма сильная линейная зависимость (рис. 4).

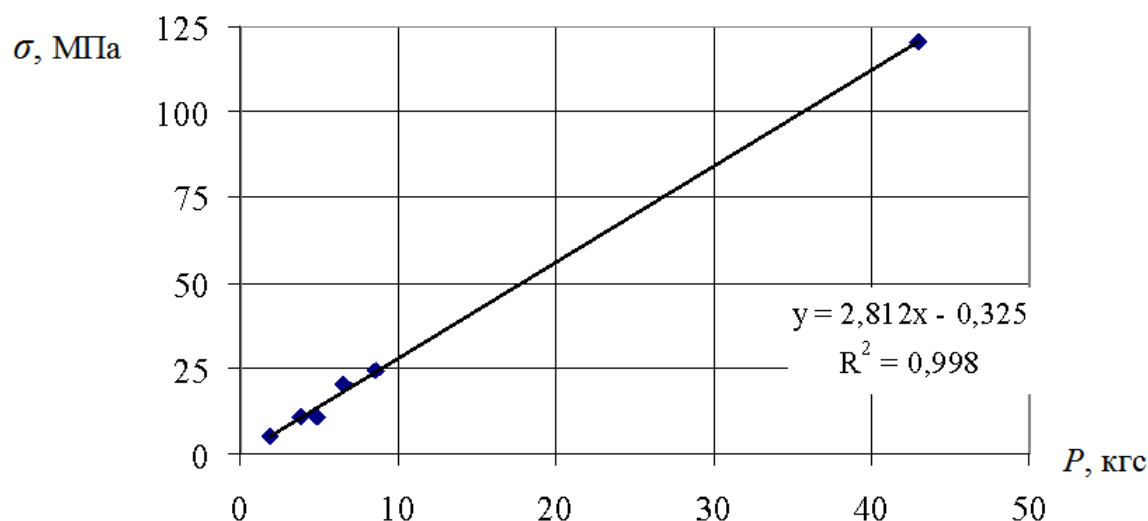


Рисунок 4 – Залежність прочности от силы вдавливания

Используя построение аппроксимирующих трендов в программе Microsoft Excel, получим, что для средних значений указанных величин эта зависимость выражается формулой:

$$\sigma = 2,812 P - 0,325, \quad R^2 = 0,998 \quad (6)$$

Подставив в уравнение (6) выражение для P последовательно из уравнения (3), затем из (4), получим искомые зависимости $\sigma = f(W)$, $\sigma = f(T)$.

$$\sigma = f(W) = 2,812(22,984 - 8,693 \ln(W)) - 0,325 = 64,306 - 24,445 \ln W \quad (7)$$

$$\sigma = f(T) = 64,306 - 24,445 \ln[(-0,517) * (A - 4,5)^2 + 11,223], \quad A = \ln(T+1) \quad (8)$$

Таким образом, прочность от времени снижается по логарифмическому закону. Прочность от влажности тоже изменяется по логарифмическому закону, но аргумент является сложным выражением (квадратичной функцией от логарифмической функции времени). Зависимости (7), (8) для прочности σ и (3), (5) для усилия вдавливания P имеют сходный характер, что является закономерным следствием линейной связи между σ и P .

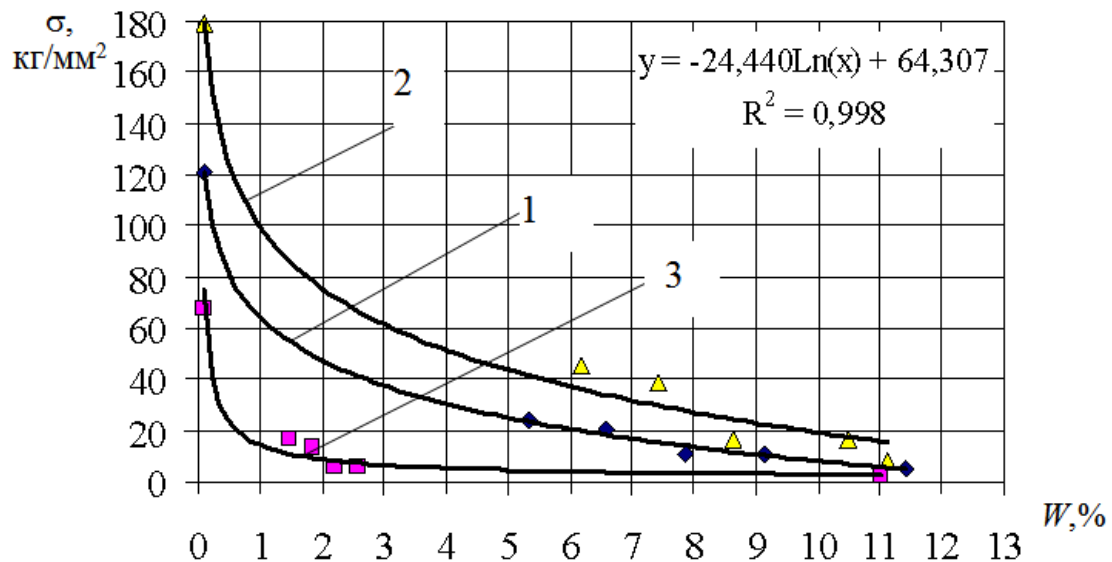
Для оценки достоверности уравнения (7) построим зависимость $\sigma = f(W)$ по экспериментальным данным табл.1 используя программу Ms. Excel (рис. 5).

Для средних значений σ наиболее высокий квадрат коэффициента корреляции имела аппроксимация в виде логарифмической функции. Математическая модель зависимости средней прочности туфа от средней влажности представляет собой логарифмическую функцию:

$$\sigma = 64,31 - 24,44 \ln W, \quad R^2 = 0,998 \quad (9)$$

Уравнение (9) имеет высокий коэффициент детерминации $R^2 = 0,998$, что свидетельствует о приемлемой функциональной зависимости $\sigma(W)$.

Уравнение (9), полученное по экспериментальным данным, практически совпадает с уравнением (7), полученным аналитическим расчетом, поэтому (9), также как и (7), приемлемо для практического использования.



1- среднее для 10 проб; 2- максимальное, образец № 7; 3 – минимальное, образец №5

Рисунок 5 – Зависимости прочности от влажности туфа

Анализ уравнения (8), для $\sigma = f(T)$, показывает, что фактически его аргументом является функция $W(T)$, которая определена выражением (2), которое имеет коэффициент детерминации $R^2 = 0,958$. Поэтому степень аппроксимации уравнения (8) приемлема и оно может использоваться для практических расчетов.

Таким образом, полученные уравнения (8) и (9) рекомендуются для практического использования при расчетах показателей разупрочнения туфа при увлажнении.

Разработан алгоритм расчета, который рекомендуется использовать для определения показателей разупрочнения туфа при увлажнении в течение времени T . Он состоит в последовательном решении следующих уравнений:

$$\begin{aligned}
 A &= \ln(T+1) \\
 W &= (-0,517) \cdot (A - 4,5)^2 + 11,223 \\
 P &= 22,984 - 8,693 \ln W \\
 \sigma &= 64,31 - 24,44 \ln W
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

где T – время увлажнения, ч; W – прирост влажности, %; P – сила вдавливания индентора, кгс; σ – прочность на сжатие, МПа.

Начальные условия: при $T = 0$, $W = 0,1\%$.

Расчет по формулам (10), например, что после 2 часов увлажнения, показывает, что влажность туфа повысится на $W = 5,24\%$, а показатели разупрочнения составят: $P = 8,6$ кгс, $\sigma = 23,8$ МПа.

В табл.3 приведено сравнение расчетных и экспериментальных показателей, где абсолютная и относительная ошибка определялись по формулам [8]:

$$\varepsilon_{\text{абс.}} = |P_{\text{расч.}} - P_{\text{эксп.}}|, \quad \varepsilon_{\text{отн.}} = |P_{\text{расч.}} - P_{\text{эксп.}}| / P_{\text{эксп.}} * 100$$

Таблица 3 – Сравнение экспериментальных и расчетных показателей

T , ч	W <i>эсп.</i>	W <i>расч.</i>	ε абс., %	ε отн., %	P <i>эсп.</i>	P <i>расч.</i>	ε абс., %	ε отн., %	σ <i>эсп.</i>	σ <i>расч.</i>	ε абс., %	ε отн., %
0	0	0	0	0	43	43	0	0	120,5	120,6	0,1	0,1
1,5	5,3	4,58	0,72	13,5	8,6	8,5	0,11	1,3	24,0	27,1	3,1	12,7
3	6,6	6,21	0,39	5,90	6,5	6,6	0,08	1,2	20,5	19,7	0,8	4,0
5	7,9	7,43	0,47	5,94	4,9	5,0	0,12	2,4	10,6	15,3	4,7	44,3
24	9,1	10,4	1,27	14,0	3,8	3,8	0,01	0,3	10,6	7,1	3,5	32,7
168	11,4	11,0	0,38	3,35	1,9	1,8	0,07	3,8	5,0	5,7	0,6	12,9
Среднее			0,57	7,1			0,06	1,5			2,4	17,8

Из таблицы видно, что значения абсолютной ошибки расчета не велики, то есть расчетные формулы пригодны для практического использования.

Разработанные математические модели для определения характеристик процесса разупрочнения туфа водой - влажности, усилия вдавливания и контактной прочности - позволяют прогнозировать процесс, как при рудоподготовке сырья, так и при добыче из отвальной массы базальтовых карьеров, а также открытым или подземным способом.

Выводы.

Результаты исследований показали, что разупрочнение туфа при увлажнении водой может служить эффективной операцией рудоподготовки.

Так, по результатам опробований 10 образцов туфа (150 измерений) получено, что при насыщении туфа водой в течение 7 суток в среднем влажность туфа возрастает на 11,4 %. При этом прочность снижается со 120,5 до 5,02 МПа, что составляет 4-5% от прочности исходного материала. Основное изменение этих параметров происходит в первые сутки увлажнения: влажность возрастает на 9,1%, отдельных образцов - до 15 %, прочность снижается со 120,5 до 10,6 МПа, в 11,4 раза. За 6 последующих суток прочность снижается с 10,6 до 5,02 МПа, влажность возрастает еще на 2,3%, с 9,1 до 11,4%.

Впервые для процесса увлажнения туфа разработаны математические модели и установлены закономерности изменения влажности и прочностных характеристик от времени. Получено, что:

- влажность туфа от времени возрастает по закону квадратичной параболы, аргументом которой является функция $Ln(T+1)$;

- прочность туфа и сила вдавливания индентора от влажности снижаются по логарифмическому закону. Прочность и сила вдавливания от времени увлажнения математически описываются логарифмическим законом, где аргумент является сложным выражением.

Разработан алгоритм расчета показателей технологии разупрочнения туфа водой, который позволяет прогнозировать повышение влажности и снижение прочностных характеристик.

Процесс рудоподготовки туфа путем увлажнения перспективен при добыче

туфов, как из обычных, так и техногенных месторождений. Расход воды составляет 10-12% от массы породы. При этом учитывается, что например, в отвалах базальтовых карьеров, в отличие от туфа, остальные породы – базальт, кварц, лавобрекчия, практически не поглощают воду. За счет этого существенно разупрочняется туфовая масса в отличие от остальных пород. Это создает условия для селективной выемки туфа из отвалов карьеров, например, путем вибрационного грохочения по мелкому классу (-2,5 + 2,0 мм), при необходимости, с предварительным дроблением в валковой дробилке.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1.Маланчук З.Р., Гринюк Т.Ю., Жомирук Р.В. [та ін.]. Основні фізико-хімічні та технологічні властивості туфів Рівненщини, Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. пр., ІГТМ НАН України, Дніпропетровськ, 2005, Вип. 59, С. 106-114.
- 2.Стець С.Є. Особливості використання і класифікація родовищ туфів за фізико-хімічними властивостями та мінералогічним складом // Матер. VI наук.-практ. конф.: Карпати, п. Спаське, Київ: Тов."Укр. інформац. центр "Наука. Техніка. Технологія", 2006, С. 191-196.
- 3.Надутьий В.П., Маланчук З.Р., Прокопюк О.Н. Обоснование необходимости комплексной переработки цеолит - смектитовых туфов Волини // Матер. Междунар. конф. "Форум горняков-2010", Днепропетровск : НГУ, 2010, С. 50-55.
- 4.Богданов Г.О., Мандигра М.С., Мельничук В.Г. [та ін.] Цеоліт-смектитові туфи Рівненщини: біологічні аспекти використання, Рівне : Волинські обереги, 2005, 184 с.
- 5.Бурденюк І.П., Ковбаса Ш.М., ВАолошук А.Г. [та ін.] Природний мінерал –базальтовий туф, перспективи застосування в харчовій промисловості, біології та медицині, Клін.та експерим. патол, 2013.-Т. XII, № 2 (44), С.35-41.
- 6.Веб. сайт «Единое окно доступа к информационным ресурсам» (2019) «Методика определения прочности горных пород», доступно за адресою: <http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/116/71116/48332>, (2019)
- 7.Шуман В. Мир камня. Горные породы и минералы, - М.: Мир, 1986. - С.112-114.
- 8.Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. – Л.: Наука, 1974. – 108 с.

REFERENCES

- 1.Malanchuk Z.Ya., Grinyuk T.Yu., Zhomiruk R.V., Stets S.E. and Rachkovsky V.P. (2005), «Basic Physico-Chemical and Technological Properties of Tufts of Rivne Region», *Geo-Technical Mechanics*, no. 59, pp. 106-114.
- 2.Stets S.E. (2006), «Features of use and classification of the tufts according to physico-chemical characteristics and mineralogical composition», *Mater. of the VI nauch.-practical conf., Karpaty, Slavske, Comp. "Ukr. Information Center." Science. Technics. Technology ""*, Kiev, Ukraine, pp. 191-196.
- 3.Nadutyu V.P., Malanchuk Z.R. and Prokopyuk O.N. (2010), «Justification of the need for complex processing tseolite-smectite tufts of Volyn», *Mater. of the Intern. conf. "Miners Forum-2010"*, NGU, Dnepropetrovsk, pp. 50-55.
4. Bogdanov G.O., Mandigra M.S. and Melnichuk V.G. (2005), *Tseolit-smektitovi tufy Rivnenshchyny: biologichni aspekty vykorystannya* [Tseolite-smectite tufts of Rivne Region: biologic application aspects, Volynski amulets, Rivne, UA.
- 5.Burdenyuk I.P., Kovbasa Sh.M., Voloshchuk A.G., Petryuk A.Ye. and Shepherd Ye.P. (2013) «Natural mineral–bazalt tuff, prospects for use in the food industry, biology and medical», *Clinical and experimental pathology*, 2013.-Т. XII, No. 2 (44), pp.35-41.
- 6.«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>.
- 7.Schuman, V. (1986), *Mir kamnya.Porody i mineraly* [The world of stone. Rocks and minerals], Mir, Moscow, Russia.
- 8.Zeidel A.N. (1974), *Oschibki izmereniya phizisheskish velichin* [Errors of measurement of physical quantities], Leningrad, Nauka, SU.

Об авторах

Надутьий Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, nadutyvp@gmail.com

Чельшикина Валентина Васильевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, chel.valenti@gmail.com

About the authors

Nadutyu Vladimir Petrovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, nadutyvp@gmail.com

Chelyshkina Valentina Vasilievna, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, chel.valenti@gmail.com

Анотація. Сьогодні туфи видобувають в малих об'ємах, але галузь їх застосування вельми широка. Базальтові цеоліт-сметитові туфи Рівненсько-Волинського регіону є цінною сировиною, яка містить калійно-магнієві солі, мідь, залізо, титан, кобальт. В ІГТМ НАН України розробляється комплексна безвідходна технологія добування з туфу металеві фракції, при цьому відходи пропонується використовувати в традиційних для туфу галузях - сільському господарстві, будівництві, медицині, біології. У статті викладені результати досліджень способу підготовки сировини до переробки шляхом знеміцнення туфу за рахунок насичення водою. На базі експериментальних досліджень вологопоглинання і міцності розроблені математичні моделі для прогнозу процесу знеміцнення туфу. Встановлено, що при насиченні водою протягом 7 діб вологість туфу зростає в середньому на 11,4%, максимум до 15%, міцність знижується зі 120,5 до 5,02 МПа, що становить 4 - 5% від міцності вихідної сировини. Основна зміна показників відбувається протягом першої доби зволоження. Математична модель зростання вологості від часу зволоження є квадратичною параболою, аргумент якої є складною функцією. Закономірності зниження міцності і сили тиску індентора від вологості і часу в загальному вигляді носять логарифмічний характер. Запропонований алгоритм розрахунку вологості і показників міцності. Процес рудопідготовки туфу шляхом зволоження перспективний при видобуванні туфів як із звичайних, так і техногенних родовищ. Витрата води складає 10-12% від маси породи. При цьому враховується, що, наприклад, у відвалах базальтових кар'єрів, на відміну від туфу, решта порід – базальт, кварц, лавобрекчия - практично не поглинають воду. За рахунок цього істотно розміцнюється туфова маса на відміну від решти порід. Це створює умови для селективної виїмки туфу з відвалів кар'єрів, наприклад, шляхом вібраційного грохочення за дрібним класом (-2,5 + 2,0 мм), при необхідності, з попереднім дробленням у валковій дробарці.

Ключові слова: математична модель, знеміцнення туфу, зволоження, рудопідготовка

Annotation. Today tuff obtains in a small volumes, but a their application field is very wide. The basalt zeolite-smectite tuffs of the Rivne-Volyn region are valuable raw materials containing potassium-magnesium salts, copper, iron, titanium, cobalt. The IGTM NAS of Ukraine is developing a complex non-waste technology for extracting metal fraction from tuff, while waste is proposed to be used in traditional for the tuff spheres: agriculture, construction, medicine, biology. The article presents results of the studies of method for preparing raw material for processing by way of tuff softening and water saturation. On the basis of experimental studies of moisture absorption and strength characteristics, the mathematical models were developed for predicting process of tuff softening. It is found that when tuff is saturated with water for 7 days, moisture content in it increases by 11.4 % on the average, up to a maximum of 15%, while its strength decreases from 120.5 MPa to 5.02 MPa, which is 4-5% of initial raw material strength. The main change occurs in the first day of moistening. Mathematical model of increasing of moisture content depending on duration of the moistening is a quadratic parabola, the argument of which is a complex function. Analytical dependences of strength decrease and rate of hardness indentation on moisture content and time are, in general, of a logarithmic character. An algorithm is proposed for calculating of moisture content and strength parameters.

The process of ore dressing of tuff by moistening is perspective at the booty of tufov, both from ordinary and technogen deposits. The expense of water makes 10-12% from mass of breed. It is thus taken into account, that, for example, in the dumps of basaltic quarries, unlike a tuff, the other breeds are a basalt, quartz, lavobrekchyya, water is not practically taken in. Due to it is substantial soften tuff mass unlike the other breeds. It creates terms for the selective extraction of tuff from the dumps of quarries, for example, by vibration screening on a small class (-2,5 + 2,0 mm), if necessary, with the preliminary crushing in a roll crusher.

Keywords: mathematical model, softening of tuff, watering, ore-preparation

Стаття надійшла до редакції 3.05.2018

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Б.О. Блюссом