

УДК 622/794:621-1

doi:10.20998/2413-4295.2017.23.06

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВОДОНАСЫЩЕНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ ОТ РАЗМЕРОВ КУСКОВ

**В. П. НАДУТЫЙ<sup>1</sup>, В. И. ЕЛИСЕЕВ<sup>2</sup>, В. И. ЛУЦЕНКО<sup>2</sup>, С. В. КОСТЫРЯ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), отдел механики машин и процессов переработки минерального сырья, г. Днепр, УКРАИНА

<sup>2</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), отдел проблем шахтных энергетических комплексов, г. Днепр, УКРАИНА  
e-mail: nadutyvp@gmail

**АННОТАЦИЯ** С целью определения зависимостей водонасыщения измельченных горных пород от времени пропитки и массы кусков проведены экспериментальные работы с образцами базальта, туфа и угля. Выполнена аппроксимационная обработка результатов экспериментов с использованием экспоненциальных функций. Показано, что выбранный класс функций с хорошей точностью описывает эмпирические данные. Выявлено, что предельное водонасыщение зависит от массы образцов, что указывает на фрактальный характер пористой структуры пород. Определены минимальные массы образцов, для которых пористую структуру можно считать однородной. Полученные зависимости позволяют проводить предварительные оценки водонасыщения в зависимости от времени пропитки и массы образцов.

**Ключевые слова:** пропитка; водонасыщение; пористая структура; базальт; уголь; туф.

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF THE WATER SATURATION OF THE MILLED MOUNT MASS FROM THE SIZES OF PIECES

**V.P. NADUTYY<sup>1</sup>, V.I. YELISEEV<sup>2</sup>, V.I. LUTSENKO<sup>3</sup>, S.V. KOSTYRYA<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Geotechnical Mechanics N.S. Polyakova of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), department of mechanics of machines and processing of mineral raw materials, Dnepr, UKRAINE

<sup>2</sup> Institute of Geotechnical Mechanics N.S. Polyakova of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), department of problems of mine energy complexes, Dnepr, UKRAINE

**ABSTRACT** In order to determine the dependence of the water saturation of crushed rock on the time of impregnation and the mass of the pieces, experimental work was carried out with samples of basalt, tuff and coal. Approximate processing of experimental results using exponential functions is performed. It is shown that the chosen class of functions describes empirical data with good accuracy. It was found that the limiting water saturation depends on the mass of the samples, which indicates the fractal nature of the porous structure of the rocks. The minimum masses of samples for which the porous structure can be considered homogeneous are determined. The obtained dependences make it possible to carry out preliminary estimates of the water saturation as a function of the impregnation time and the mass of the samples. The performed complex of studies allows to determine the water saturation time of the rock under study taking into account the mass of the pieces and the characteristics of the porosity of these materials. The obtained data serve as the initial information when preparing products from the material under study, as well as the technology of their dehydration. The obtained analytical dependencies make it possible to predict the water saturation of the crushed rock mass in preparation for use or further processing.

**Keywords:** impregnation; water saturation; porous structure; basalt; coal; tuff.

### Введение

Капиллярные свойства пористых тел играют важную роль в различных технологических процессах, например, пропитка и обезвоживание, которые являются часто необходимыми звеньями общих технологий обработки и дальнейшего использования продуктов горнодобывающей промышленности. При разработке и усовершенствовании соответствующего оборудования и технологических приемов необходимо с достаточно хорошей точностью определять величины капиллярных сил и

рассчитывать процессы, связанные с движением жидкости в пористых телах с учетом действия этих сил. Для насыпных сред с достаточно узким распределением частиц по диаметру и со сравнительно однородной структурой в настоящее время хорошо разработан математический аппарат, который по необходимости дополняется экспериментально получаемыми параметрами. В других случаях, особенно для природных материалов данные о структуре чрезвычайно малы, вследствие чего экспериментальные методы составляют в настоящее время основу получения необходимых данных для дальнейших работ.

### Цель работы

В данной статье излагаются результаты экспериментальных исследований по пропитке образцов базальта и туфа с Рафаловского карьера (Ровенская область) и антрацитового угля (Донецкая область). В нашем случае эти материалы, различны по химическому составу, по генезису своего образования и структуре [1, 2]. Объединяет их то, что они имеют широкое применение, доступны для исследования с целью усовершенствования технологических операций и имеют сложную поровую систему, представляющую значительный интерес для изучения.

### Изложение основного материала

Методология эксперимента хорошо известна и изложена в многочисленных учебных пособиях, величины водопоглощения и водонасыщения также содержатся в научной и учебной литературе. Однако, для определенных работ с этими материалами необходимы конкретные знания, раскрывающие динамические особенности пропитки и обезвоживания.

В результате вышесказанного был проведен ряд экспериментов на определения степени водонасыщения горной массой различной крупности. Эксперимент проходил следующим образом: исследуемый материал с нулевой влажностью и различной крупностью был помещен в емкость с водой и через определенный отрезок времени производился контрольный замер влажности и материал обратно помещался в водную среду до полного насыщения. После полного насыщения порового пространства в материале влажность стала постоянной.

Результаты экспериментальных исследований показаны на рис. 1 – 3 (маркеры, соединенные тонкими линиями, соответствуют значениям, полученным экспериментально).

Из рассмотрения этих кривых следует два важных вывода. Первый состоит в том, что, за время эксперимента наступает предельное или, по крайней мере, очень близкое к предельному влагонасыщение поровой системы испытываемых образцов. По характеру кривых видно, что для всех кусков влагопоглощение растет монотонно и приближается к некоторой предельной величине. Другим важным выводом является то, что кускам разных размеров соответствуют различные величины предельного водонасыщения. Известно, что дисперсные материалы обладают фрактальными свойствами [3], о чем в нашем случае свидетельствует зависимость предельного насыщения образцов от размеров куска. Это указывает на то, что, например, с уменьшением его размеров изменяется и перколяционная система порового пространства. Это естественно, т.к. поровая

система содержит как относительно широкие каналы, так и очень узкие и тупиковые, а то и полностью закрытые поры, не участвующие в водопоглощении. Принимая во внимание, что вся поровая структура связана с образованием материала, условиями его пребывания в месторождении, а также с методами добычи, то ясно, что даже некоторые осредненные параметры будут иметь большие разбежки, о чем свидетельствуют литературные данные о пористости, удельной массе и водонасыщении этих материалов [4-9]. Не имея статистических распределений каналов по размерам и объемам ясно, что наиболее широкие, влагонепроводящие поровые каналы или трещины имеют некоторое размещение в объеме образцов, при этом, чем образец больше, тем с большим основанием такое распределение можно принять однородным. Чем меньше размер куска, тем меньше вероятность попадания в него хорошо влагонепроницаемого участка и, соответственно разброс в значениях водопоглощения будет большим. Таким образом, неоднородность распределения проводящих каналов может быть определена при анализе экспериментальных данных, относящихся к насыщенному состоянию. Используя значения влагонасыщения, относящиеся к окончанию эксперимента, получим следующие кривые, показанные на рис. 4 – 6

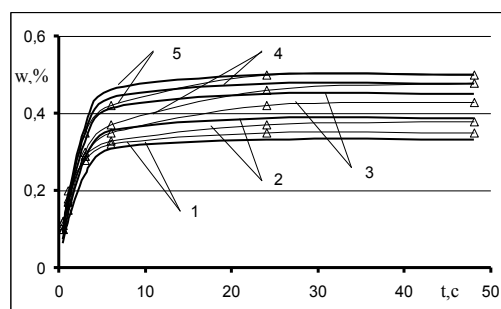


Рис. 1 – Зависимость насыщения кусков базальта разной массы влагой от времени:

1 -  $M = 438$  г; 2 - 590г; 3 - 913г; 4 - 1240г; 5 - 2800г

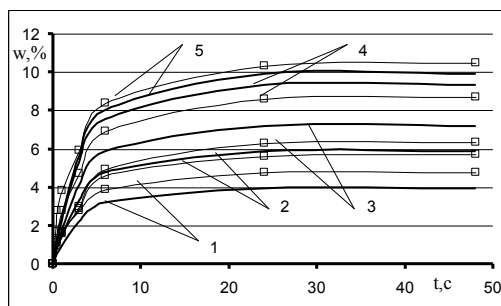


Рис. 2 – Зависимость насыщения кусков туфа разной массы влагой от времени:

1 -  $M = 315$  г; 2 - 535г; 3 - 735г; 4 - 1220г; 5 - 1430г

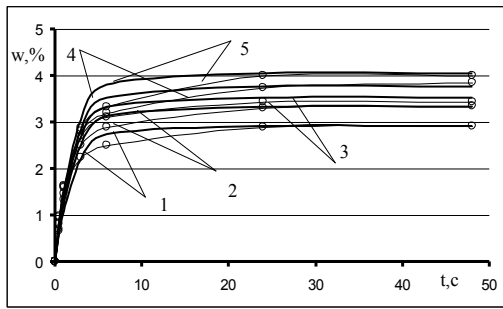


Рис. 3 – Зависимость насыщения кусков угля разной массы влагой от времени:

1 -  $M = 300$  г; 2 - 387г; 3 - 445г; 4 - 527г; 5 - 685г

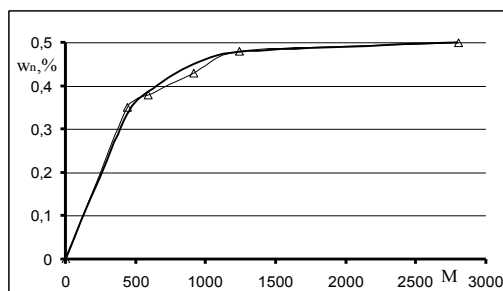


Рис. 4 – Зависимость предельного насыщения кусков базальта от их масс

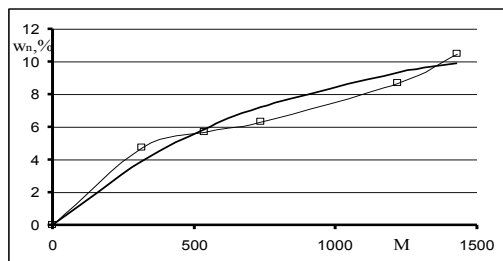


Рис. 5 – Зависимость предельного насыщения кусков туфа от их масс

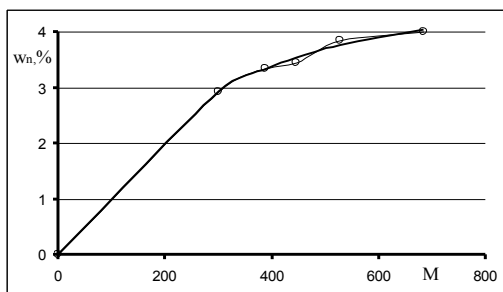


Рис. 6 – Зависимость предельного насыщения кусков угля от их масс

Из рис. 4 видно, что для базальта кривая  $W_n$  по своему характеру близка к экспоненциальной

(асимптотически приближающейся к некоторой величине) и практически достигает своего однородного значения, соответствующего большому куску. Для угля кривая еще не достигает своей однородной величины, а в случае с туфом она совсем далека от такого значения. С целью получения простых математических зависимостей, необходимых в дальнейших исследованиях, по всем полученным экспериментальным данным была проведена аппроксимация кривых. В основу базовых зависимостей, принимая во внимание экспоненциальный характер кривых, показанных на рис.1 - 6, была положена формула вида  $w = w_n [1 - \exp(-\lambda t)]$ , где  $w_n = W [1 - \exp(-\gamma M)]$ , при этом коэффициенты  $W, \gamma, \lambda$  определяются методом наименьших квадратов с использованием экспериментальных точек. При выборе вида функциональной зависимости водонасыщения от времени важно подчеркнуть, что, как это можно заметить из рис. 1 - 3, время достижения насыщения во всех кусках одной и той же породы примерно одинаково, т.е. не видно каких-то больших различий в выходе кривых на свою полочку. Это дает возможность принять коэффициент  $\lambda$  независимым от размеров куска и принять его для каждой породы соответственно постоянным. В результате вычисления этих коэффициентов были найдены следующие простые формулы для определения водонасыщения измельченной горной породы, в зависимости от времени и массы кусков:

для базальта

$$\begin{aligned} w &= w_n [1 - \exp(-0.425t)], \\ w_n &= 0.5 [1 - \exp(-M / 400)]; \quad (1) \\ \sigma_n &= 0.0118, \quad \sigma = 0.0328; \end{aligned}$$

для туфа

$$\begin{aligned} w &= w_n [1 - \exp(-0.278t)], \\ w_n &= 11.8 [1 - \exp(-M / 780)]; \quad (2) \\ \sigma_n &= 0.665, \quad \sigma = 0.696; \end{aligned}$$

для угля

$$\begin{aligned} w &= w_n [1 - \exp(-0.469t)], \\ w_n &= 4.4 [1 - \exp(-M / 275)]; \quad (3) \\ \sigma_n &= 0.0612, \quad \sigma = 0.202; \end{aligned}$$

где  $\sigma_n = \left[ \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 (w_n^k - w_n(M_k))^2 \right]^{0.5}$  и

$$\sigma = \left[ \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 \left[ \frac{1}{6} \sum_{m=1}^6 (w_n^{m,k} - w(M_k, t_m))^2 \right] \right]^{0.5}$$

соответственно средние квадратичные ошибки для кривых  $W_n$  и  $W$ .

На приведенных выше рисунках показаны кривые (сплошные линии без маркеров),

рассчитанные по формулам (1 – 3). По величине средней квадратичной ошибки, да и по рис. 5 видно, что для туфа результат оказался наихудшим, но вполне удовлетворительным для оценок необходимых параметров. Сами величины  $\sigma_n$  и  $\sigma$  оказались небольшими, особенно для базальта, что говорит о вполне удачном выборе базовых функций, отражающих физические особенности процесса пропитки. Постоянство коэффициента  $\lambda$  в пределах интервала используемых в экспериментах объемов, возможно, свидетельствует о том, что в кусках сохраняется некоторое самоподобие поровой структуры. Еще одна деталь, проявляющаяся в формулах (1 – 3) указывает на то, что для туфа  $\lambda$  представляет наименьшее значение среди других величин. Известно, что туф является высокопористым материалом, который должен быстро впитывать влагу, однако, видимо, большинство пор являются глухими, а влагопоглощающие связаны друг с другом узкими каналами с большими сопротивлениями. Если положить экспоненту в квадратных скобках в выражении для  $w_n$  равной 0.01, то можно с хорошей точностью определить массу куска, для которого структуру поровой системы в его объеме можно считать вполне однородной: для угля это - 1266г и более, для базальта – 1842г, для туфа – 3592г.

### Выводы

Выполненный комплекс исследований позволяет определить время водонасыщения исследуемой горной породы с учетом массы кусков и характеристик пористости этих материалов. Полученные данные служат исходной информацией при подготовке изделий из исследуемого материала, а также технологии их обезвоживания. Полученные аналитические зависимости позволяют прогнозировать водонасыщение измельченной горной массы при подготовке ее к использованию или дальнейшей переработке.

### Список литературы

1. Тюменцева, О. В. Минералы и горные породы / О. В. Тюменцева. – Омск. Изд. СибАДИ. – 2000. – 62с.
2. Гюльмалиев, А. М. Теоретические основы химии угля / А. М. Гюльмалиев, Г. С. Головин, Т. Г. Гладун. М.: Изд-во Московского государственного горного университета. 2003. – 556с.
3. Ролдугин, В. И. Фрактальные структуры в дисперсных системах / В. И. Ролдугин // Успехи химии. – 2003. – Т. 72, вып. 10. – С. 931 – 960.
4. Патент на корисну модель № 92897 UA, МПК В02D 61/56 (2006.1). Пристрій для зневоднення / В. П. Надутый, В. В. Сухарев, С. В. Костыря; заявник і патентовласник ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України. – у 2014 03 312; заявл. 01.04.2014, опубл. 10.09.2014, Бюл. № 17. – 4 с.

5. Гришкин, Н. Н. Классификация по крупности для обогащения минеральных частиц / Н. Н. Гришкин, В. Б. Кусков, Я. В. Кускова // Обогащение руд. – 2008. – № 2. – С. 24-26.
6. Jamil Sami Haddad. Complex Dehydration of Rock Mass: / Jamil Sami Haddad, Sukharev V. V., Kostyrya S. V. // International Journal of Engineering and Science. – 2015. – Vol.5, Issue 9. – P. 7-10.
7. Надутый, В. П. Теоретические оценки влияния некоторых параметров процесса комплексного обезвоживания горной массы / В. П. Надутый, В. И. Елисеев, В. И. Луценко, С. В. Костыря // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2016. – Вип. 126. – С. 36-42.
8. Стариков, А. П. Прогрессивные технологии обогащения – основа эксплуатационной надежности и эффективности угольного производства / А. П. Стариков, Н. И. Канев, Л. В. Байсаров, А. Н. Редька // Уголь. – 2010. - №2. – С. 52-55.
9. Skott, B. The screen Vor-Siv for dewatering and classification / B. Skott // Oystermen Coal Mining. – 1982. – № 8. – P. 158-161.
10. Rutherford, L. J Mining and preparation considerations to combat problems of boiler slogging and fouling: XIV international cool preparation congress and exhibition / L. J. Rutherford. Sandton: Sandton Convention Centre. – 2002. – P. 97-106.

### Bibliography (transliterated)

1. Tyumentseva, O. V. Mineraly i gornye porody – Omsk. Izd. Si-bADI. – 2000. – 62s.
2. Gulymaliev, A. M., Golovin G. S., Gladun T. G. Teoreticheskie osno-vyi himii uglya. M.: Izd-vo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo uni-versiteta. 2003. – 556s.
3. Roldugin, V. I. Fraktalnye strukturyi v dispersnyih sistemah, Uspehi himii, 2003, 72, 10, 931 – 960.
4. Patent na korisnu model № 92897 UA, MPK V02D 61/56 (2006.1). Pristriy dlya znevodnennya / V.P. Nadutyi, V.V. Suharev, S.V. Kostyrya; zayavnik i patentovlasnik IGTM M.S. Polyakova NAN Ukrayini. – u 2014 03 312; zayavl. 01.04.2014, opubl. 10.09.2014, Byul. # 17. – 4 s.
5. Grishkin, N. N., Kuskov, V. B., Kuskova, Ya. V. Klassifikatsiya po krupnosti dlya obogascheniya mineralnyh chastits, Obogaschenie rud, 2008, 2, 24-26.
6. Jamil Sami Haddad, Suharev, V. V., Kostyrya, S. V. Complex Dehydration of Rock Mass, International Journal of Engineering and Science, 2015, 5, 9, 7-10.
7. Nadutyiy, V. P., Eliseev, V. I., Lutsenko, V. I., Kostyrya, S. V. Teoreticheskie otsenki vliyaniya nekotoryih parametrov protsessa kompleksnogo obezvozhivaniya gornoy massyi, Geotekhnichna mehanika: Mizhvid. zb. nauk. pratsi IGTM NAN Ukrayini, 2016, 126, 36-42.
8. Starikov, A. P., Kanev, N. I., Baysarov, L. V., Redka, A. N. Progressivnyie tehnologii obogascheniya – osnova ekspluatatsionnoy nadezhnosti i effektivnosti ugolnogo proizvodstva, Ugol, 2010, 2, 52-55.
9. Skott, B. The screen Vor-Siv for dewatering and classification, Oystermen Coal Mining, 1982, 8, 158-161.
10. Rutherford, L. J. Mining and preparation considerations to combat problems of boiler slogging and fouling: XIV international cool preparation congress and exhibition. Sandton: Sandton Convention Centre, 2002, 97-106.

**Сведения об авторах (About authors)**

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

**Vladimir Nadutyu** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Geotechnical Mechanics N.S. Polyakova of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), head of the department of mechanics of machines and processing of mineral raw materials, Ukraine, Dnepr, e-mail: nadutyvp@gmail.com.

**Елисеев Владимир Иванович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), отдел проблем шахтных энергетических комплексов, Украина, г. Днепр, e-mail: helgasobakagnivik@ukr.net.

**Vladimir Eliseev** - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Geotechnical Mechanics N.S. Polyakova of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), department of problems of mine energy complexes, Ukraine, Dnepr, e-mail: helgasobakagnivik@ukr.net.

**Луценко Василий Иванович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), отдел проблем шахтных энергетических комплексов, Украина, г. Днепр, e-mail: lvi151156@gmail.com.

**Vasily Lutsenko** - candidate of technical sciences, Senior Researcher, Institute of Geotechnical Mechanics N.S. Polyakova of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), department of problems of mine energy complexes, Ukraine, Dnepr, e-mail: lvi151156@gmail.com.

**Костыря Сергей Владимирович** – аспирант, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), отдел механики машин и процессов переработки минерального сырья, Украина, г. Днепр, e-mail: kostyrya81@gmail.com.

**Sergey Kostyrya** - post-graduate student, Institute of Geotechnical Mechanics N.S. Polyakova NAS of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Department of Mechanics of Machines and Processes of Mineral Processing, Ukraine, Dnepr, e-mail: kostyrya81@gmail.com.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Надутьий, В. П.** Экспериментальное определение зависимости водонасыщения измельченной горной массы от размеров кусков / **В. П. Надутьий, В. И. Елисеев, В. И. Луценко, С. В. Костыря** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. - № 23 (1245). – С. 36-40. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.06.

*Please cite this article as:*

**Nadutyu, V. P., Eliseev, V. I., Lutsenko, V. I., Kostyrya, S. V.** Experimental determination of the dependence of the water sediment of the milled mount mass from the sizes of pieces. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2017, **23** (1245), 36-40. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.06.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Надутьий, В. П.** Експериментальне визначення залежності водонасичення подрібненої гірської маси від розмірів шматків / **В. П. Надутьий, В. І. Єлісєєв, В. І. Луценко, С. В. Кости́ря** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. - № 23 (1245). – С. 36-40. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.06.

**АНОТАЦІЯ** З метою визначення залежностей водонасичення подрібнених гірських порід від часу просочення і маси шматків проведені експериментальні роботи зі зразками базальту, туфу і вугілля. Виконана апроксимаційна обробка результатів експериментів з використанням експоненціальних функцій. Показано, що обраний клас функцій з хорошою точністю описує емпіричні дані. Виявлено, що граничне водонасичення залежить від маси зразків, що вказує на фрактальний характер пористої структури порід. Визначено мінімальні маси зразків, для яких пористу структуру можна вважати однорідною. Отримані залежності дозволяють проводити попередні оцінки водонасичення в залежності від часу просочення і маси зразків.

**Ключові слова:** просочення, водонасичення, пориста структура, базальт, вугілля, туф.

*Поступила (received) 31.05.2017*