

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УРАНОСОДЕРЖАЩИХ РУД И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

С. И. Скипочка, Т. А. Паламарчук, Л. В. Прохорец

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

ул. Симферопольская, 2-А, г. Днепр, 49005, Украина.

E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Приведены результаты исследований физико-механических свойств ураносодержащих пород, позволившие установить, что, несмотря на их высокую плотность, основной показатель – прочность – существенно зависит от размеров образцов, что обусловлено наличием в ураносодержащих породах аномально высокой пористости и трещиноватости. Поэтому необходимо использование методов, позволяющих оценивать прочность пород непосредственно в условиях их естественного залегания. Для этого была усовершенствована и адаптирована к условиям урановых месторождений методика и аппаратура, в основе которой лежит метод ударного импульса, что позволит существенно повысить безопасность ведения горных работ и увеличить сроки эксплуатации горных выработок.

Ключевые слова: горные породы, прочность на сжатие, экспресс-контроль, длительность ударного импульса, масштабный фактор.

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УРАНОВИХ РУД І ПОРІД, ЩО ЇХ ВМІЩУЮТЬ

С. І. Скіпочка, Т. А. Паламарчук, Л. В. Прохорець

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

вул. Сімферопольська, 2- А, м. Дніпро, 49005, Україна.

E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Наведені результати досліджень фізико-механічних властивостей порід, що містять уран, які дозволили встановити, що, незважаючи на їхню високу густину, основний показник – міцність – істотно залежить від розмірів зразків, що обумовлено наявністю в породах, що містять уран, аномально високої пористості і тріщинуватості. Тому необхідно використання методів, що дозволяють оцінювати міцність порід безпосередньо в умовах їхнього природного залягання. Для цього була вдосконалена та адаптована до умов уранових родовищ методика та апаратура, в основі якої лежить метод ударного імпульсу, що дозволить істотно підвищити безпеку ведення гірських робіт і збільшити строки експлуатації гірських вироблень.

Ключові слова: гірські породи, міцність на стискання, експрес-контроль, тривалість ударного імпульсу, масштабний фактор.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Одним из ключевых моментов в сложном процессе добычи полезных ископаемых является обеспечение устойчивости подземных горных выработок различного назначения, откосов карьеров, других подземных и заглубленных объектов. Расчет устойчивости обнажений массива горных пород, крепей и охранных конструкций, как правило, осуществляется по дейст-

вующим государственным или отраслевым нормативно-техническим документам, ведомственным инструкциям и методикам. В основе расчетов по любому из указанных документов лежит информация о физико-механических свойствах горных пород, руд, углей и т. д. При этом основными показателями служат прочностные и, в меньшей мере, упругие характеристики, сведения о которых получают на стадии геологоразведочных работ путем лабораторных испытаний кернового материала. В некоторых случаях такую информацию дополняют данными лабораторных механических исследований проб горных пород, выборочно отобранных в горных выработках на стадии разработки месторождения.

Анализ данных о физико-механических свойствах пород показал, что коэффициент вариации прочности в пределах одного литотипа на одном и том же месторождении может достигать нескольких сотен процентов. Это означает, что обеспечить безопасность ведения горных работ, повысить устойчивость горных выработок и других обнажений массива можно только путем системного и массового его контроля. Однако сгустить сетку при проведении контроля не позволяют технические возможности, а также высокая стоимость и трудоемкость бурения и механических испытаний.

В строительной индустрии, где требования к устойчивости сооружений намного жестче и выше, такая проблема решается использованием ряда нормативных методов неразрушающего контроля бетона и других строительных материалов. При этом наиболее достоверные результаты обеспечивает метод ударного импульса, получивший наибольшее распространение для контроля бетонных и железобетонных конструкций. К сожалению, прямой перенос этого метода на массив горных пород невозможен по ряду причин.

Цель работы состоит в адаптации метода ударного импульса применительно к экспресс-контролю прочностных характеристик ураносодержащих руд и вмещающих пород на месте их залегания для повышения безопасности и увеличения срока эксплуатации выработок.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В соответствии с экспериментальными данными показатели прочности в неоднородных и анизотропных средах зависят от размеров неоднородностей по отношению к исследуемой зоне или области воздействия сооружения, а также от направления действия нагрузки.

Неоднородность среды приводит к проявлению масштабного эффекта в отношении прочностных характеристик. В общем случае графики масштабного эффекта прочностных свойств, отражающие уменьшение показателей этих свойств с увеличением масштаба измерений аппроксимируются кусочно-гладкими кривыми, точки перегиба которых соответствуют границам блоков различных порядков. Из этого следует, что установленные опытным путем характеристики прочностных свойств справедливы лишь для масштаба измерений, для которого они определены. Если при переходе к более крупным объемам породы качество дефектов и других элементов неоднородности не изменялось, то можно ожидать, что показатели прочности не подвергаются значительным изменениям. Если же переход к более крупным объемам породы сопровождается

качественным изменением ее состава, строения и состояния, то изменяются и показатели прочности [1].

Прочностные свойства массивов горных пород определяются двумя группами факторов. К первой группе относятся: генезис, минеральный состав, структурные и текстурные особенности слагающих их пород или ассоциаций, характер и степень первичной трещиноватости, неоднородности и анизотропность. Вторая группа включает характеристики состояния пород в массиве: вторичную трещиноватость, выветрелость, измененность, обводненность, специфику проявления естественных напряжений, температурный режим, вторичную неоднородность и анизотропность. Наибольшие сложности возникают при учете влияния факторов второй группы, которым часто принадлежит определяющая роль в формировании прочностных свойств массивов.

В настоящее время в отечественной и зарубежной практике оценка прочностных свойств массивов производится на основании определения показателей этих свойств в отдельных характерных точках среды с последующей интерполяцией полученных данных на весь исследуемый массив с учетом его геолого-структурных особенностей и характеристик состояния.

Для выяснения влияния трещиноватости на прочностные свойства пород анализировались изменения значений физико-механических показателей свойств для пород одинакового петрографического состава, структуры и текстуры, но с различной степенью тектонической трещиноватости [2–8]. Результаты исследований, приведенные на рис. 1, показали, что с увеличением степени тектонической нарушенности массивов параметры физико-механических свойств пород в образцах, отобранных из этих массивов, существенно уменьшаются.

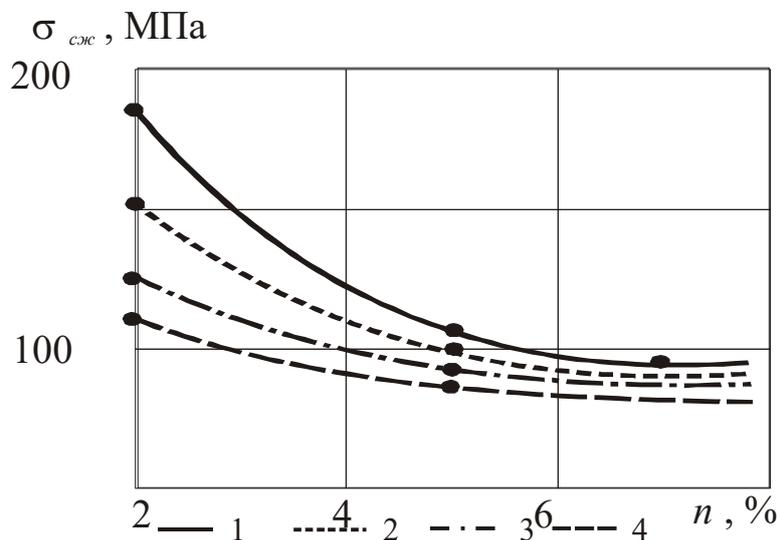


Рисунок 1 – Изменение предела прочности на сжатие пород в зависимости от степени трещиноватости (n) массива:
 1 – порфиоровые базальты; 2 – толеитовые базальты;
 3 – известняки; 4 – габбро-диабазы

Сравнение экспериментальных кривых для базальтов, песчаников, известняков и габбро-диабазов показало, что с увеличением степени тектонической нарушенности массивов различия в физико-механических свойствах пород, обусловленных их генезисом, минеральным составом и структурно-текстурными особенностями, сглаживаются, породы приобретают близкие значения прочностных и деформационных свойств.

Из рис. 1 отчетливо видна дифференциация показателя прочности пород различного состава в пределах массивов с первичной трещиноватостью ($n \sim 2\%$). Различия величины между самыми прочными порфировыми базальтами ($\sigma_{сж} = 170$ МПа) и самыми слабыми из изученных разностей – известняками ($\sigma_{сж} = 80$ МПа) составляет 90 МПа, т. е. более 100 %.

По мере увеличения трещиноватости и в том числе микротрещиноватости образцов, эти различия нивелируются и для массивов с повышенной трещиноватостью ($n = 5-6\%$) составляют 20 МПа, т. е. 20 %, а для сильнотрещиноватых пород ($n = 7-8\%$) всего около 15 МПа, т. е. около 13 %.

Переход от свойств пород в образце к свойствам массива на том же масштабном уровне предусматривает введение поправок, учитывающих различное состояние горных пород в образце и в условиях естественного залегания. Это различие прежде обуславливается трещиноватостью, обводненностью, напряженным состоянием, температурным режимом, газонасыщенностью и др. Среди всех этих факторов ведущая роль принадлежит трещиноватости и связанной с ней обводненности массива, а также напряженному состоянию.

Выполненные расчеты значений прочности сульфидных руд с различной степенью трещиноватости образцов и массива показали достаточно высокую сходимость с фактически полученными результатами (табл. 1)

Математическая обработка экспериментальных результатов позволила установить следующую зависимость прочности от числа трещин [9]:

$$\sigma_{сж} = \sigma_{сж.о} [1,4 / (2 + n) + 0,3], \quad (1)$$

где $\sigma_{сж.о}$ – прочность на сжатие в опорном образце (без трещин);
 n – степень трещиноватости породы.

Таблица 1 – Фактические и расчетные значения прочности сульфидных руд с различной степенью трещиноватости образцов и массива

Прочность на сжатие		$[\sigma_p - \sigma_\phi) / \sigma_\phi] \times 100\%$
$\sigma_p = \sigma_{p.м} / \sigma_{p.о}$	$\sigma_\phi = \sigma_{\phi.м} / \sigma_{\phi.о}$	
0,92	0,85	8,2
0,84	0,78	7,7
0,77	0,71	8,4
0,7	0,65	7,7
0,64	0,6	6,7
0,58	0,55	5,5
0,53	0,5	6
0,48	0,48	0

Стандартизованими дослідженнями фізико-механичних властивостей уранодержачих порід встановлено, що, незважаючи на їх високу щільність, основний показателю – міцність, суттєво залежить від розмірів зразків, причому мінімальні розміри зразків, які дозволяють отримувати достовірні значення, становлять 150x150x150 мм. Тому при середній міцності порід 170-220 МПа випробування порід, які містять уран, виходять за межі можливостей серійного обладнання. Високий масштабний ефект міцності обумовлений наявністю в родовищах горизонтів з аномально високою пористістю, яка в 2-3 рази перевищує звичайні значення, і тріщинуватістю, яка вище звичайної в 10-20 раз. Такі аномалії потребують використання методів, які дозволяють оцінювати міцність порід безпосередньо в умовах природного залягання, т. є. в масиві. Для визначення міцності порід в масиві була удосконалена і адаптована до умов уранових родовищ методика і апаратура, в основі якої лежить метод ударного імпульсу, який дозволяє оцінювати міцність за зміною тривалості ударного імпульсу (рис. 2, 3). Розробка була успішно апробована в умовах уранового родовища (г. Желті Води). Впровадження розробки суттєво підвищить безпеку гірських робіт і ефективність підтримки виробіток [10].

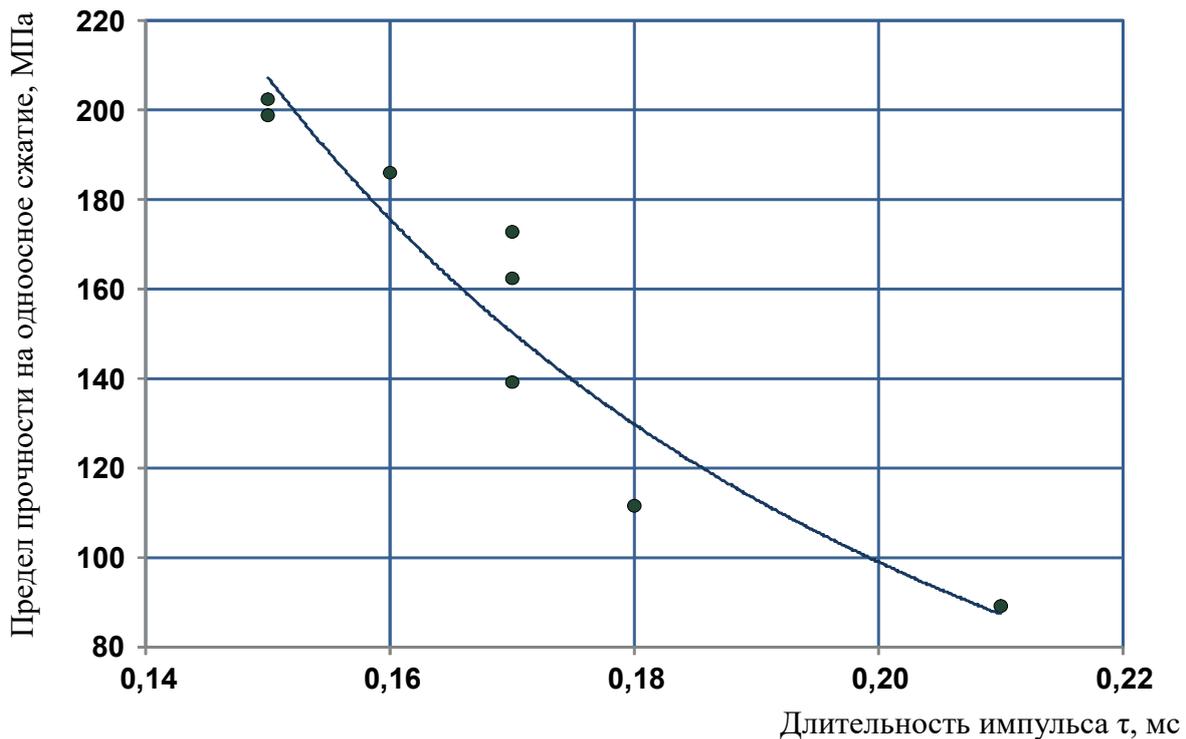


Рисунок 2 – Експериментальна залежність між тривалістю ударного імпульсу і межею міцності на одностороннє стиснення для залізного кварциту

В сукупності для всіх випробуваних різновидностей геоматеріалів найкраще наближення аналітичної залежності до експериментальних даних забезпечується при використанні степової функції виду:

$$\sigma_{сж.} = a\tau^{-b}, \quad (2)$$

где a и b – коэффициенты, являющиеся характеристикой геоматериала;
 τ – длительность ударного импульса.

Уравнения регрессии, в соответствии с аналитической зависимостью (2) представлены в табл. 2.

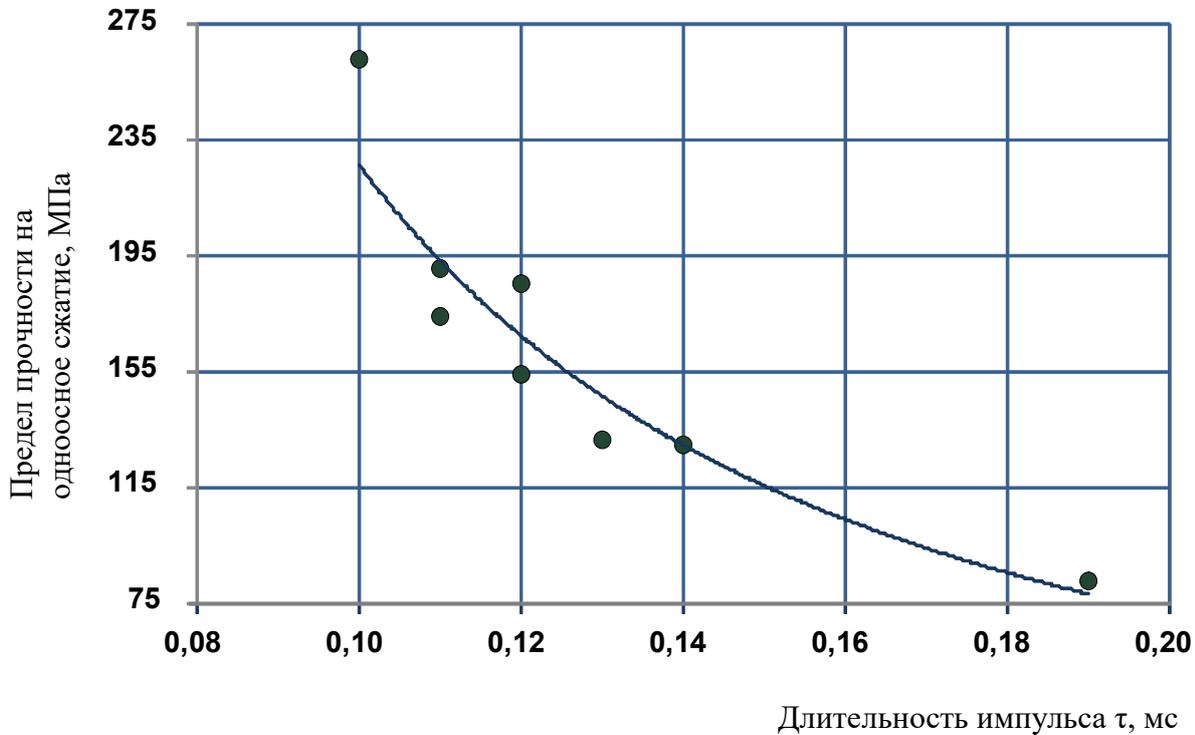


Рисунок 3 – Экспериментальная зависимость между длительностью ударного импульса и пределом прочности на сжатие для магнетито-амфиболитового сланца

Таблица 2 – Уравнения регрессии для описания зависимости прочности пород от длительности ударного импульса

Исследуемый геоматериал	Уравнение регрессии	Достоверность уравнения
Железистый кварцит «богатый»	$\sigma_{сж.} = 1,5775\tau^{-2,572}$	0,9
Магнетито-амфиболитовый сланец	$\sigma_{сж.} = 3,1912\tau^{-1,857}$	0,92

Для контроля бетонной крепи выработок и оценки состояния кровли: заколов, расслоений и отслоений, была усовершенствована периферийная часть аппаратуры виброакустического контроля ДИКОН, с целью ее применения в шахтах по добыче урана и железной руды. В частности, разработан активный приемник вибрации с повышенной электромагнитной устойчивостью во влагозащищенном исполнении. Апробация аппаратуры была выполнена в условиях Желтореченского уранового и Запорожского железорудного месторождений в горизонтальных выработках высотой до 6 м и в вертикальном вентиляционном стволе.

Установив закономірності впливання таких макродефектів, як трещиноватості, на прочностні свойства горних порід і довготривалість ударного імпульса, представляється можливим оцінювати прочність горних порід в масиві на основі вимірювання показателів довготривалості ударного імпульса. Передбачувана методика заключається в наступному. Для представительної групи образців однієї літологічної різновидності, отобранних з району майбутніх натурних досліджень, визначаються в лабораторних умовах прочність і довготривалість ударного імпульса за розробленою методикою. Далі в масиві для геометричного об'єкта, прочність якого необхідно знайти, проводяться вимірювання довготривалості ударного імпульса. Прочність в масиві визначається за встановленими закономірностями в лабораторних умовах.

ВИВОДИ. Дослідженнями фізико-механічних властивостей ураносодержащих порід встановлено, що, незважаючи на їх високу щільність, основним показателем - прочністю суттєво залежить від розмірів образців, що обумовлено наявністю в ураносодержащих породах аномально високої пористості і трещиноватості. Тому необхідно використання методів, що дозволяють оцінювати прочність порід безпосередньо в умовах їх природного залягання. Для цього була вдосконалена і адаптована до умов уранових родовищ методика і апаратура, в основі якої лежить метод ударного імпульса, що дозволить суттєво підвищити безпеку ведення горних робіт і збільшити терміни експлуатації горних виробіток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаумян Л.В. Итоги исследования по инженерно-геологическому изучению скальных массивов и дальнейшие перспективы // Инж. геол. Сегодня: теория, практика, проблемы. – М., 1988. – № 8. – С. 92–95.
2. Куринной В.П., Гаркуша И. П. Некоторые аспекты физических процессов в породном массиве, возникающих при распространении ударных волн // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 2(12). – С. 20–26.
3. Губайдуллин Г. А. Приборный комплекс оперативного контроля прочности бетона // В мире НК. – 2002. – № 2(16). – С. 21–22.
4. Бауков А. Ю. Опыт комплексного применения геофизических методов неразрушающего контроля при обследовании подземных объектов и памятников культуры г. Москвы. – М.: ГИАБ, 2005. – № 7. – С. 87–92.
5. Role of NDE in quality control during construction of concrete infrastructures on the basis of service life design: [3 Kumamoto International Workshop on Fracture, Acoustic Emission and NDE in concrete (KIFA-3), Kumamoto, Apr. 24, 2003] Nan Ningxu. Constr. and Build. Mater. – 2004. – № 3. – P. 163–172.
6. Non-destructive testing of concrete with electromagnetic and elastic waves: modeling and imaging / K.J. Langenberg, K. Mayer, R. Marklein // Cement&Concrete Composites. – University of Kassel, Germany, 2006. – № 28. – P. 370–383.
7. Li Z. J. Non-destructive testing on concrete // The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong SAR, 28th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE&STRUCTURES: 28-29 August 2003. – Singapore, 2003. – P. 37–48.

8. Улыбин А. В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 4. – С. 10–15.
9. Геомеханический мониторинг горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры / В.И. Ляшенко, С.И. Скипочка, А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук // Цветная металлургия. – 2011. – № 9. – С. 3–15.
10. Экспресс-оценка прочности горных пород в массиве методом ударного импульса / С.И. Скипочка, Т.А. Паламарчук, В.Н. Сергиенко, Л.В. Прохорец // Металлургическая и горная промышленность. – 2013. – № 2. – С. 74–77.

FEATURES DEFINITIONS OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF URANIUM ORE AND HOST ROCKS

S. Skipochka, T. Palamarchuk, L. Prohorec

M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine

vul. Simpheropolskaya, 2-A, Dnipro, 49005, Ukraine.

E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Purpose. To adapt shock pulse method for the express control of strength characteristics of uranium-bearing ores and host rocks at the site of their occurrence to improve safety and extend the service life of mines. **Methodology.** Strength characteristics estimation was performed based upon on identified indicators of these in individual points of the medium, followed by interpolation of the data for the entire array is analyzed considering its geological and structural characteristics and status characteristics. Changes in the values of physical and mechanical properties of rocks of the same petrographic composition, structure and texture, but with varying degrees of tectonic fractures, was analyzed to determine the fracture effect on the strength properties of the rocks. Methods and equipment were refined and adapted to the conditions of uranium mines to determine the strength properties of the array, which are based on shock pulse method that allows evaluating the strength properties of the array. Shock pulse method is based upon the change of the shock pulse duration. Methods of the mathematical statistic were used to process the experimental results. **Results.** Examination of the physical and mechanical properties of uranium-bearing rocks revealed that, in spite of their high density, the main indicator - the strength, essentially depends on the sample size, which is due to the presence in uranium-bearing rocks of anomalously high content of pores and fractures. Therefore it is necessary to use methods that allow assessing the strength properties of the rocks directly in terms of their natural occurrence. For this purpose methods and equipment were refined and adapted to the conditions of uranium mines, which are based on the shock pulse method. This will significantly improve safety of mining operations and increase service life of mines. **Originality.** The laws of shock interaction of the elastic body with uranium-bearing ores and host rocks are established. Also, informative parameter that allows assessment of rocks strength properties by the shock pulse method is substantiated. **Practical value.** Methods and tools for the rocks strength evaluation by shock pulse method for the uranium-bearing ores and host rocks in underground conditions were adapted. References 10, tables 2, figures 3.

Key words: rocks, compressive strength, express control, duration of the shock pulse, scale factor.

REFERENCES

1. Shaumjan, L.V. (1988), "Total of investigation on engineering and geological study of rocky massif and further perspectives", *Ing. geol. Today: theory, practice, problems*, no. 8, pp. 92–95.
2. Kurinnoy, V.P. and Garkusha, I.P. (2013), "Some aspects of the physical processes in rock massif, which appear at propagation of shock waves", *Suchasni resursoenergozberigauchi tehnologiyi girnichogo virobnitstva*, vol. 2, no. 12, pp. 20–26.
3. Gubaidullin, G.A. (2002), "Instrument complex operational control of concrete strength", *The NDK world*, vol. 2, no. 16, pp. 21–22.
4. Baukov, A.Yu. (2005), "Experience of complex application of geophysical methods in non-destructive testing inspection of underground facilities and Moscow cultural monuments", *GIAB*, no. 7, pp. 87–92.
5. Role of NDE in quality control during construction of concrete infrastructures on the basis of service life design: [3 Kumamoto International Workshop on Fracture, Acoustic Emission and NDE in concrete (KIFA-3), Kumamoto, Apr. 24, 2003] *Nan Ningxu. Constr. and Build. Mater.* – 2004. – № 3. – P. 163–172.
6. Langenberg, K. J., Mayer, K., Marklein, R. "Non-destructive testing of concrete with electromagnetic and elastic waves: modeling and imaging", *Cement&Concrete Composites*. – University of Kassel, Germany, 2006. – № 28. – P. 370–383.
7. Li Z. J. "Non-destructive testing on concrete", *The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong SAR, 28th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE&STRUCTURES: 28-29 August 2003*. – Singapore, 2003. – P. 37–48.
8. Ulybin, A.V. (2011). "On the choice of control methods of concrete strength built facilities", *Civil Engineering Journal*, no. 4, pp. 10–15.
9. Ljashenko, V.I., Skipochka, S.I., Yalansky, A.A. and Palamarchuk, T.A. (2001), "Geomechanical monitoring rocks at underground workings of deposit compound structure", *Coloured metallurgy*, no. 9, pp. 3–15.
10. Skipochka, S.I., Palamarchuk, T.A., Sergienko, V.N. and Prohorec, L.V. (2013), "Express estimation of rock strength in massif by shock pulse method", *Metalurgical and mining*, no. 2, pp. 74–77.

Стаття надійшла 07.06.2016.