УДК 622.023.25: 539.32

С.В. Сукнёв

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВЛАЖНОСТИ*

Исследованы упругие свойства вмещающих пород алмазных месторождений Якутии. На одноосное сжатие испытаны образцы горных пород (известняк, алевролит) в воздушно-сухом и влажном состоянии. Задача исследования - установление экспериментальных закономерностей изменения упругих свойств породных образцов с изменением их состояния, характеризуемого количеством избыточной (по сравнению с воздушно-сухим состоянием) влаги в образце. Использован метод, основанный на регистрации малых обратимых деформаций образца, суть которого состоит в том, что продольные и поперечные деформации измеряются при нагружении образца в определенном диапазоне, когда деформирование материала является линейно-упругим и не приводит к необратимым структурным изменениям. Это позволило провести полный цикл испытаний на одном образце и исключить погрешности, связанные с разбросом свойств от образца к образцу. Образец погружали в воду и выдерживали до полного насыщения. Испытания проводили в процессе естественного высыхания образца через определенные промежутки времени, и по диаграммам деформирования рассчитывали значения модуля упругости и коэффициента Пуассона. Цикл испытаний одного образца составил 28 суток. Изменение упругих свойств в зависимости от степени водонасыщения носит существенно нелинейный характер. При влажности образца, составляющей 20% от максимального уровня (в водонасыщенном состоянии), изменение свойств алевролита составило более 50%, а известняка – более 90% от максимального изменения, которое достигается в водонасыщенном состоянии по сравнению с воздушно-сухим состоянием. Ключевые слова: горные породы, сжатие, модуль упругости, коэффициент Пуассона, влажность.

и сследования влияния влажности на механические свойства горных пород обычно ограничиваются изучением свойств образцов в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии. Однако важно знать, как сильно изменяются свойства при низких и умеренных уровнях водонасыщения? Имеются еди-

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-45-05014). ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 108—116. © 2016. С.В. Сукнёв.

ничные работы, в которых свойства горных пород изучаются в промежуточных (между воздушно-сухим и водонасыщенном) состояниях. Количество промежуточных точек с различным уровнем водонасыщения в этих работах, как правило, невелико. К примеру, в работе [1] свойства пород изучаются в воздушно-сухом состоянии, водонасыщенном состоянии и при одном уровне частичного водонасыщения. Делать по этим данным какие-то выводы о влиянии влажности на прочностные и деформационные свойства проблематично.

Работа посвящена исследованию закономерностей изменения упругих свойств горных пород различной влажности. Для определения упругих свойств горных пород при одноосном сжатии в настоящее время используют ГОСТ 28985-91 [2]. В соответствии со стандартом модуль упругости и коэффициент Пуассона материала рассчитывают по разгрузочным диаграммам деформирования образца после его нагружения до заданного уровня, который должен быть не ниже 50% от предела прочности материала при одноосном сжатии. Поскольку для большинства горных пород необратимые структурные изменения, связанные с процессами образования микротрещин, начинаются при напряжениях, составляющих 30—50% от предела прочности [3—5], то, строго говоря, определение упругих свойств по ГОСТ 28985-91 нельзя считать физически корректным.

Кроме того, из-за необратимых структурных изменений невозможно повторное испытание образца. Это не позволяет проследить за изменением упругих характеристик материала вследствие изменения его состояния (температуры или влажности). К примеру, для изучения влияния влажности придется испытывать разные образцы, увлажненные до различного уровня водонасыщения. Такое исследование достаточно трудоемко, поскольку связано с изготовлением и испытанием большого количества образцов. К тому же, эти затраты могут оказаться совершенно напрасными, поскольку сама постановка эксперимента является некорректной ввиду разброса свойств от образца к образцу. Опираясь на статистический анализ достоверности полученных результатов, можно будет, в лучшем случае, судить о свойствах материала в контрастных (воздушно-сухом и водонасыщенном) состояниях. Для установления закономерностей влияния влажности на изменение упругих свойств образца горной породы необходимо обеспечить возможность их определения непосредственно в процессе изменения состояния испытуемого образца.

Для этого предлагается использовать метод, разработанный ранее для определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона горных пород при изменении температуры [6] и основанный на регистрации малых обратимых деформаций образца. Суть метода состоит в том, что продольные и поперечные деформации измеряются при нагружении образца в определенном диапазоне, когда деформирование материала является линейно-упругим и не приводит к необратимым структурным изменениям. Снизу этот диапазон ограничен напряжениями, при которых происходит уплотнение образца, т.е. закрываются открытые микропоры и микротрещины. На диаграмме деформирования это проявляется в переходе от начального нелинейного участка к линейному. Сверху диапазон измерения ограничен напряжениями, при которых начинается накопление поврежденности, образование новых микротрещин, что приводит к необратимым структурным изменениям.

Испытание проводится путем многократного нагружения образца в диапазоне малых обратимых деформаций. Для определения упругих свойств нижнее напряжение принимается равным 0,5 от верхнего напряжения. При этом верхнее напряжение не должно превышать одной трети от предела прочности ма-



Рис. 1. Испытательная машина UTS 250

териала при одноосном сжатии, который определяется предварительно в соответствии с ГОСТ 21153.2-84 [7].

В работе [6] при исследовании влияния температуры на упругие свойства горных пород образец с установленными датчиками деформаций помещали в температурную камеру, в которой поддерживалась постоянная температура. Камера монтировалась непосредственно на испытательной машине (рис. 1). Затем образец охлаждали до заданной температуры и проводили испытание. Для исследования влияния влажности на изменение свойств материала вместо температурной камеры следует использовать климатическую камеру, в которой необходимо под-

держивать определенный микроклимат – температуру и влажность с возможностью изменения влажности воздуха в широких пределах для того, чтобы обеспечить максимальное водонасыщение образца. Поскольку такие климатические камеры для испытательной машины UTS 250 не производятся, поступали следующим образом. Образец насышали в ванне с водой до максимального уровня, затем его извлекали из ванны, устанавливали экстензометры (датчики продольной и поперечной деформации) и помещали образец на испытательную машину (рис. 2). Испытания проводили в процессе естественного высыхания образца через определенные промежутки времени, и по диаграммам деформирования рассчитывали значения модуля упругости и коэффициента Пуассона. Цикл испыта-



Рис. 2. Образец с экстензометрами, размещенный на нижней опорной плите испытательной машины UTS 250

ний одного образца составлял 28 суток. В течение этого времени образец оставался на машине. Предварительно для образца строили диаграммы водонасыщения и водопотери, измеряя его вес в процессе насыщения водой и затем — в процессе высыхания. Высушивание образца, так же как и его последующие испытания, производилось при комнатной температуре естественным путем.

Исследовали упругие свойства образцов известняка и алевролита. Поскольку определение коэффициента Пуассона связано с необходимостью измерения с достаточной точностью малых поперечных перемещений образца в диапазоне 1...10 мкм, а возможности окружных и диаметральных датчиков деформаций в силу их конструктивных особенностей весьма ограничены [8], использовали датчики прямого действия фирмы Toni Technik, Германия [9]. Образцы представляли собой призмы квадратного сечения 50×50 мм и высотой 150 мм. База продольного датчика составляла 80 мм, база поперечного датчика — 45 мм. Испытания проводили на электромеханической машине UTS 250

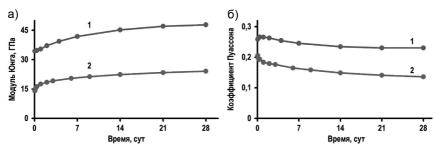


Рис. 3. Зависимости модуля Юнга (а) и коэффициента Пуассона (б) известняка (1) и алевролита (2) от времени высыхания

(рис. 1), прошедшей модернизацию по технологии ZMART.PRO (фирма Zwick, Германия).

На рис. 3 приведены графики изменения модуля Юнга (модуля упругости) и коэффициента Пуассона в процессе высыхания образцов. Первые измерения проведены через 1 час после извлечения образца из ванны. Модуль Юнга алевролита демонстрирует монотонное увеличение, а коэффициент Пуассона – монотонное уменьшение с потерей влаги образцом. Наиболее интенсивно упругие свойства алевролита изменяются в первые сутки и затем стабилизируются по мере высыхания образца. Изменение свойств испытанного образца известняка происходит более сложным путем. Модуль Юнга также демонстрирует монотонное увеличение, но в отличие от алевролита его изменение в первые часы после начала высушивания незначительно. Коэффициент Пуассона ведет себя немонотонно и в первые часы демонстрирует рост, который затем сменяется снижением. Причиной такого поведения упругих свойств является резко неоднородное распределение влаги вблизи поверхности образца в начале его высыхания. Это происходит, когда скорость испарения влаги с поверхности образца значительно превышает скорость ее миграции из внутренней области к поверхности. При этом большое значение имеет также способ нагружения образца, форма его поперечного сечения, и расположение экстензометров на образце.

На рис. 4 приведены графики относительного изменения (увеличения модуля Юнга и уменьшения коэффициента Пуассона) упругих характеристик в процессе высыхания образцов. Изменение свойств рассчитано по сравнению с воздушно-сухим состоянием, которое достигается по окончанию цикла испытаний. Там же приведены графики относительного умень-

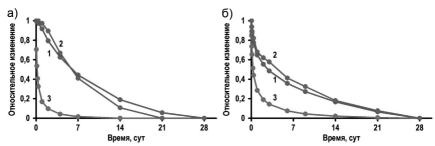


Рис. 4. Относительное изменение модуля Юнга (1), коэффициента Пуассона (2), влажности (3) известняка (а) и алевролита (б) от времени высыхания

шения избыточной (по сравнению с воздушно-сухим состоянием) влаги в образцах. Максимальная влажность образцов составила: известняка -1,6%, алевролита -4,4%.

Приведенные на рис. 4 графики позволяют произвести сравнение скоростей изменения влажности образцов и их упругих характеристик. Как видно из рис. 4, восстановление упругих свойств происходит гораздо медленнее, чем процесс высыхания образцов. Это означает, что изменение упругих свойств горных пород в зависимости от их влажности носит существенно нелинейный характер. Это наглядно показано на рис. 5, где приведены данные об изменении упругих свойств испытанных образцов в период высушивания от 1 до 28 суток, когда процесс высыхания можно считать квазистационарным, а распределение влаги в образце — однородным. При низких уровнях водонасыщения (до 0,2 от максимального уровня) упругие свойства демонстрируют достаточно быстрое изменение (уменьшение модуля Юнга и увеличение коэффициента Пуассона). Изменение свойств алевролита составило более 50% от максимального

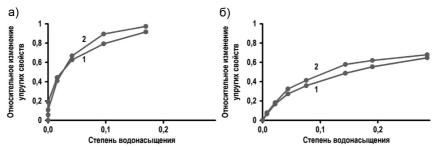


Рис. 5. Относительное изменение модуля Юнга (1) и коэффициента Пуассона (2) известняка (а) и алевролита (б) от степени водонасыщения

изменения, которое достигается в водонасыщенном состоянии по сравнению с воздушно-сухим состоянием. Для известняка это изменение превысило 90%. То есть при влажности образца, составляющей всего 17% от максимального уровня, его упругие характеристики практически соответствуют значениям в водонасышенном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Kodama J., Goto T., Fujii Y., Hagan P.* The effects of water content, temperature and loading rate on strength and failure process of frozen rocks // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2013. Vol. 62. P. 1–13.
- 2. *ГОСТ 28985-91*. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.-11 с.
- 3. *Martin C. D.*, *Chandler N. A.* The progressive fracture of Lac du Bonnet granite // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1994. Vol. 31, No. 6. P. 643–659.
- 4. Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., Read R. S. Identifying crack initiation and propagation tresholds in brittle rock // Can. Geotech. J. 1998. Vol. 35, No. 2. P. 222—233.
- 5. Hakala M., Kuula H., Hudson J. A. Estimating the transversely isotropic elastic intact rock properties for in situ stress measurement data reduction: A case study of the Olkiluoto mica gneiss, Finland // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. -2007. Vol. 44, No. 1. P. 14-46.
- 6. Сукнев С. В. Методика определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона при изменении температуры образца // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 8. С. 101-105.
- 7. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.-8 с.
- 8. Сукнев С. В. Использование окружных и диаметральных датчиков деформаций для определения коэффициента Пуассона при сжатии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 12. С. 22-27.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Cукнёв Cергей Bикторович — доктор технических наук, зав. лабораторией,

e-mail: suknyov@igds.ysn.ru,

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН.

UDC 622.023.25: 539.32 S.V. Suknev

DETERMINATION OF STATIC ELASTIC MODULUS AND POISSON'S RATIO OF ROCKS UNDER WATER CONTENT VARIATION

The analysis is focused on elastic properties (elasticity modulus, Poisson's ratio) of wall rocks at diamond deposits in Yakutia. Uniaxial compression tests involved air-dry and wet specimens of rocks (limestone, siltstone). The research objective was to find observable regular patterns in the change of elastic properties of the specimens with the change in their state characterized by excess moisture content (wet as against air-dry). The method of recording of small reversible strains in a specimen is based on the fact that longitudinal and transverse strains are measured in a specimen under loading within a certain range when deformation is linearly elastic and results in no irreversible structural changes. This method allowed complete testing cycle using a single specimen and eliminated errors due to different properties of specimens. A specimen was placed in water until complete saturation. Testing was carried out in the course of natural drying of the specimen, in certain time intervals, and the elastic modulus and Poisson's ratio were evaluated based on the resultant deformation diagrams. The test cycle was 28 day per specimen. It is found that the change in the elastic properties as a function of water saturation has essentially nonlinear character. When moisture content of a specimen was 20% of the maximum level (in water-saturated state), the properties of siltstone and limestone changed more than by 50% and 90%, respectively, of the maximum change reached in water-saturated state as against air-dry state.

Key words: rock, compression, elastic modulus, Poisson's ratio, water content.

AUTHOR

Suknev S.V., Doctor of Engineering Sciences, Head of Laboratory, e-mail: suknyov@igds.ysn.ru, N.V. Chersky Institute of Mining of the North, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 677980, Yakutsk, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is executed at financial support of Russian Foundation for Basic Research (project No. 15-45-05014).

REFERENCES

- 1. Kodama J., Goto T., Fujii Y., Hagan P. The effects of water content, temperature and loading rate on strength and failure process of frozen rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2013. Vol. 62. P. 1–13.
- 2. Porody gornye. Metod opredeleniya deformatsionnykh kharakteristik pri odnoosnom szhatii. GOST 28985-91 (Rocks. Method for determination of deformation characteristics under uniaxial compression. State Standart 28985-91), Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov, 2004. 11 p.
- 3. Martin C. D., Chandler N. A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 1994. Vol. 31, No. 6. P. 643–659.
- 4. Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., Read R. S. Identifying crack initiation and propogation tresholds in brittle rock. *Can. Geotech. J.* 1998. Vol. 35, No. 2, P. 222–233.
- 5. Hakala M., Kuula H., Hudson J.A. Estimating the transversely isotropic elastic intact rock properties for in situ stress measurement data reduction: A case study of the Olkiluoto mica gneiss, Finland. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2007. Vol. 44, No. 1. P. 14–46.
 - 6. Sukney S. V. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2013, no 8, pp. 101–105.

- 7. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii. GOST 21153.2-84 (Rocks. Methods for determination of axial compression strength. State Standart 21153.2-84), Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov, 2001, 8 p.
 - 8. Suknev S. V. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2012, no 12, pp. 22–27.
 - 9. Suknev S. V. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2013, no 8, pp. 97–100.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК, ОБОРУДОВАННЫХ СИСТЕМАМИ МОНИТОРИНГА ПЛАВНОСТИ ЛВИЖЕНИЯ СКИПОВ

*Трифанов Геннадий Дмитриевич*¹ — доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: 2983723@gmail.com,

Микрюков Алексей Юрьевич¹ — аспирант, e-mail: Alexey_mic@mail.ru,

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

Рассмотрена задача проведения постоянного контроля контактных нагрузок в системе «подъемный сосуд – жесткая армировка» вертикальных шахтных стволов. Приведены данные аппаратурных динамических испытаний в промышленных условиях, результаты измерений обработаны с помощью компьютера, представлены в графическом виде. Изучен характер и диапазон изменения динамических нагрузок от движущихся подъемных сосудов по всей длине шахтного ствола. На основе проведенных исследований разработана система контроля плавности движения скипов. Обоснована необходимость разработки и внедрения систем мониторинга плавности движения скипов, с целью более объективной оценки ее работоспособности и динамической устойчивости.

Ключевые слова: непрерывный контроль, вертикальный шахтный ствол, шахтная подъемная установка, подъемный сосуд, жесткая армировка, направляющие проводники, динамические нагрузки, регистрация параметров, защита.

INCREASED EFFICIENCY OPERATING MINE LIFTING INSTALLATIONS APPOINTED SYSTEMS MONITORING SMOOTH OF MOVEMENT SKIPS

*Trifanov G.D.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair, e-mail: 2983723@gmail.com, *Mikryukov A. Yu.*¹, Graduate Student, e-mail: Alexey_mic@mail.ru,

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

A series of research works, the main purpose of which is elk development of a method of dynamic loads control in the system of «shaft skip - rigid reinforcement» was required to hold for the research of negative influence of dynamic processes in the mine shaft reinforcement to work of mine hoisting plants. Causes impacts of the shaft skip on mine shaft furniture are periodical stiffness of the shaft furniture, deviation of shaft furniture from vertical in the lateral and frontal directions, the inaccuracy of shaft furniture joints, the transverse oscillations of shaft skips over unwinding hoisting wire ropes, the displacement of gravity center of shaft skips. Due to variable loads shaft skips come out of the guides, interrupting the smooth movement of the skips in shaft. The problem of carrying out the constant monitoring of the contact loads in the system «skip – rigid reinforcement» of vertical mining shafts was considered. The data of instrumental and dynamic testing in industrial conditions was listed; the measurement results are processed using the computer is shown in a graph. Character and range of the dynamic loads variation from the moving hoist skip along the entire length of the mine shaft was studied. On basis of the studies developed the control system fluidity of the movement of skips. For a more objective assessment of performance and dynamic stability of the monitoring system, we need the development and implementation of monitoring systems for the smooth movement of skips. The research results confirm the effectiveness of developed techniques hardware and software status control reinforcement of shafts. The decision of tasks may be used to the operating conditions of the vertical shafts equipped with a rigid reinforcement.

Key words: continuous controls, mine hoisting plants, mine hoist installation, shaft skip, mine shaft furniture, rigid reinforcement, dynamical force, safety devices, registration of parameters, protect.