

УДК 622.023.25:539.32

Сукнёв Сергей Викторович

доктор технических наук,
заведующий лабораторией,
Институт горного дела Севера
им. Н.В. Черского СО РАН,
677980, г. Якутск, пр. Ленина, д. 43
e-mail: suknyov@igds.yasn.ru

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО
МОДУЛЯ УПРУГОСТИ
И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА
ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПЕРЕХОДЕ ИЗ ТА-
ЛОГО В МЕРЗЛОЕ СОСТОЯНИЕ****Аннотация:*

Исследованы упругие свойства вмещающих пород алмазных месторождений Якутии с помощью стандарта организации СТО 05282612-001-2013. Стандарт разработан на основе оригинальной методики, которая позволяет определять статические упругие свойства (модуль упругости, коэффициент Пуассона) при изменении температуры или влажности материала, что не предусмотрено действующими российскими и международными стандартами, но имеет важное практическое значение для проектирования горных сооружений в криолитозоне. Испытание проводится путем многократного нагружения образца в диапазоне малых обратимых деформаций, что позволяет повысить точность измерений и физически корректно оценивать влияние температуры на изменение свойств материала при переходе из талого в мерзлое состояние. На одноосное сжатие испытывали образцы горных пород (известняк, алевролит) в воздушно-сухом и влажном состоянии. Образец с установленными датчиками деформаций помещали в температурную камеру и проводили испытания последовательно: при комнатной температуре и при температурах 0°C, -20°C и -40°C. Установлено, что с понижением температуры образца его модуль упругости возрастает, в то время как коэффициент Пуассона остается постоянным. Для исследования влияния влажности 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. Отмечено, что изменение упругих свойств в зависимости от степени водонасыщения носит существенно нелинейный характер.

Ключевые слова: горные породы, сжатие, модуль упругости, коэффициент Пуассона, низкие температуры, влажность.

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.04.072

Suknev Sergey V.

Doctor of technical sciences,
the head of the laboratory,
Chersky Institute of Mining of the North SB RAS,
677980, Russia, Yakutsk, 43 Lenin prospect
e-mail: suknyov@igds.yasn.ru

**DETERMINATION
OF THE STATIC ELASTICITY MODULUS
AND POISSON'S RATIO OF THE ROCKS
PASSING FROM THAWED
TO FROZEN STATE***Abstract:*

The elastic properties of enclosing rocks at diamond deposits in Yakutia are studied with the help of internal standard STO 05282612-001-2013. The standard has been developed based on an original procedure that enables determination of static elastic properties (modulus of elasticity, Poisson's ratio) under variation of temperature or water content in a material, which is neglected by the effective Russian and international standards but is of critical importance in mine construction in permafrost zone. The testing includes multiple loading of specimen within the range of low reversible strains, which enables highly accurate measurement of strain and physically correct estimation of temperature effect on change in properties of the material passing from thawed to frozen state. The uni-axial compression tests involved specimens of rocks (limestone, siltstone) in air-dried and wet condition. Specimen with extensometers attached to it was placed in a temperature control chamber and tested sequentially under room temperature and, then, under 0°C, -20°C and -40°C. It has been found that as the temperature is lowered, the elasticity modulus of the specimen grows and Poisson's ratio remains unaltered. For investigation of moisture effects a specimen was placed in water until complete saturation. Testing was carried out in the course of specimen, natural drying in certain time intervals, and the elastic modulus and Poisson's ratio were evaluated based on the resultant stress-strain diagrams. It was found that the change in the elastic properties as a function of water saturation has essentially nonlinear character.

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

* Исследования выполнены в рамках программы фундаментальных исследований СО РАН (проект 0382-2016-0002) и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-45-05014)

Введение

Упругость является фундаментальным физическим свойством горных пород, определяющим их механическое поведение [1]. Модуль упругости (модуль Юнга) используется в качестве важнейшего параметра при анализе деформаций породного массива и проектировании объектов горного строительства, таких как тоннели, подземные выработки, откосы, фундаменты [2 – 4]. Такую же важную роль при упругом деформировании горных пород и в геотехнических приложениях играет коэффициент Пуассона [5]. В настоящее время упругие свойства горных пород при одноосном сжатии определяются в соответствии с ГОСТ 28985-91 [6] на разгрузочной ветви диаграммы деформирования после нагружения образца до максимального 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 новых трещин, начинаются при напряжениях, составляющих 30 – 50 % от предела прочности материала при одноосном сжатии [7 – 9], применение ГОСТ 28985-91 для определения упругих свойств горных пород физически некорректно. Кроме того, из-за необратимых структурных изменений невозможно повторное испытание образца. Это не позволяет проследить за изменением упругих характеристик материала при изменении температуры образца, что важно знать для проектирования горных сооружений в условиях криолитозоны или применения геотехнологий, предусматривающих замораживание породного массива. Необходимо также отметить, что стандарт не распространяется на мерзлые горные породы. С учетом этого была разработана методика определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона [10, 11], позволяющая физически корректно определять упругие характеристики горных пород в талом и мерзлом состоянии. На ее основе разработан стандарт организации СТО 05282612-001-2013 «Метод определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона горных пород при одноосном сжатии призматических образцов» [12].

Целью исследования является установление закономерностей изменения статических упругих характеристик (модуль Юнга, коэффициент Пуассона) вмещающих горных пород различной влажности в диапазоне изменения температуры испытания, характерном для условий криолитозоны, в которой расположены алмазные месторождения Якутии. Ранее [13] были исследованы упругие свойства вмещающих пород в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии. Однако важно знать, как сильно изменяются свойства при низких и умеренных уровнях водонасыщения. Влияет ли уровень водонасыщения на характер изменения упругих свойств при переходе материала из талого в мерзлое состояние?

Методика исследования

Испытания образцов горных пород проводили в соответствии с СТО 05282612-001-2013 на испытательной машине UTS 250, оснащенной температурной камерой (рис. 1).

Из керна вмещающих пород (известняк, алевролит) трубки «Ботуобинская» изготавливали призматические образцы квадратного сечения со стороной 50 мм и высотой 150 мм. На образец устанавливали продольные и поперечные экстензометры 0712.001 и 0712.004 фирмы Topi Technik либо экстензометры 3975 и 3542RA фирмы Epsilon. Эти датчики позволяют корректно и с высокой точностью измерять деформационные перемещения (абсолютные деформации) образца. Образец с установленными датчиками помещали в температурную камеру (рис. 2) и проводили испытания последовательно: при комнатной температуре и при температурах 0°C, –20°C и –40°C. Испытание проводили путем многократного нагружения образца в диапазоне малых обратимых деформаций. По диаграммам продольных и поперечных деформаций определяли значения модуля упругости и коэффициента Пуассона.



Рис. 1 – Испытательная машина UTS 250 с температурной камерой



Рис. 2 – Образец в температурной камере

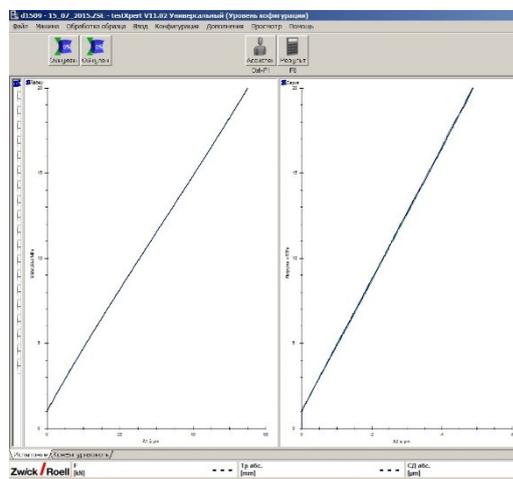


Рис. 3 – Диаграммы продольных (слева) и поперечных (справа) деформаций образца алевролита

На рис. 3 приведен скриншот программы испытаний testXpert с типичными диаграммами продольных и поперечных деформаций образца алевролита, полученными с помощью датчиков деформаций 0712.001 и 0712.004.

Каждая диаграмма получена по результатам измерений на трех циклах нагружения до напряжения 20 МПа, т. е. фактически состоит из трех кривых, наложенных друг на друга. По этим диаграммам можно судить о линейно-упругом характере деформирования материала в заданном диапазоне нагружения и о корректности работы датчиков деформаций.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 4 приведены графики изменения модуля упругости (модуля Юнга) и коэффициента Пуассона трех образцов алевролита, обозначенных цифрами 1, 2, 3, в воздушно-сухом состоянии в зависимости от температуры. Каждый образец испытывали три раза. Для предотвращения образования конденсата на поверхности образца принимали меры к его гидроизоляции. Перед каждым испытанием и после испытания контролировали влажность (вес) образца. Повторное испытание проводили спустя несколько дней после предыдущего, убедившись в стабилизации воздушно-сухого состояния образца. Повторяемость результатов определения упругих свойств составила для модуля упругости – выше 99 %, для коэффициента Пуассона – выше 94 %.

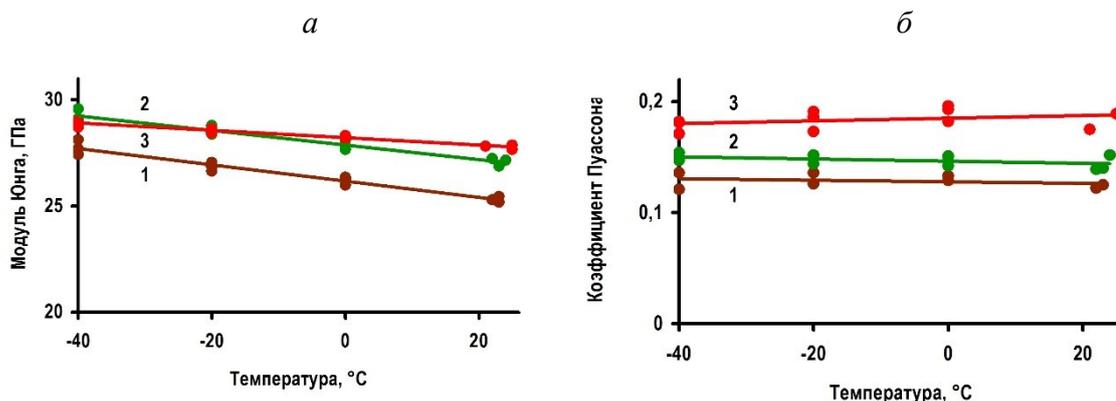


Рис. 4 – Зависимости модуля Юнга (а) и коэффициента Пуассона (б) образцов алевролита от температуры

Из рис. 4 видно, что с понижением температуры модуль упругости образцов алевролита линейно возрастает, в то время как коэффициент Пуассона сохраняет постоянное (в пределах погрешности эксперимента) значение. Скорость возрастания модуля упругости с понижением температуры составила от 0,017 до 0,038 ГПа / град.

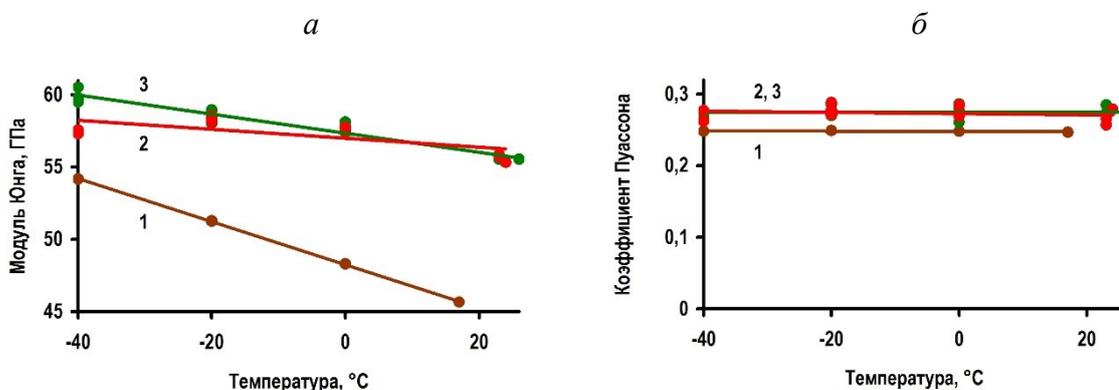


Рис. 5 – Зависимости модуля Юнга (а) и коэффициента Пуассона (б) образцов известняка от температуры

На рис. 5 приведены графики изменения модуля упругости и коэффициента Пуассона трех образцов известняка в воздушно-сухом состоянии в зависимости от температуры.

Так же, как и для алевролита, отмечается тенденция к увеличению модуля упругости с понижением температуры образца при сохранении постоянного значения коэффициента Пуассона. Скорость возрастания модуля упругости с понижением температуры составила от 0,031 до 0,149 ГПа / град.

Образцы алевролита также испытывали во влажном состоянии при низких и умеренных уровнях водонасыщения. На рис. 6 приведены графики изменения модуля упругости и коэффициента Пуассона образца алевролита в зависимости от температуры в воздушно-сухом (прямые 1) и влажном (прямые 2 и 3) состоянии при двух уровнях водонасыщения. Степень водонасыщения составляла 6,5 и 40 % от максимального количества влаги, которое содержит образец в водонасыщенном состоянии и которое составило 2,6 % по отношению к массе образца в воздушно-сухом состоянии. С увеличением влажности наблюдается снижение модуля упругости и повышение коэффициента Пуассона во всем температурном диапазоне. При этом поведение упругих характеристик качественно не изменяется: сохраняются скорость возрастания модуля упругости с понижением температуры и постоянство коэффициента Пуассона в исследованном температурном диапазоне.

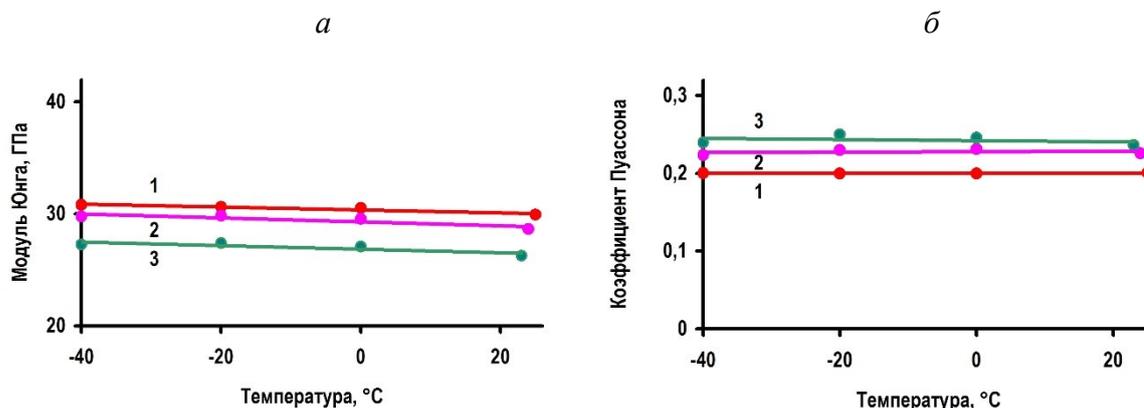


Рис. 6 – Зависимости модуля Юнга (а) и коэффициента Пуассона (б) образца алевролита от температуры

Аналогичные данные приведены на рис. 7 для другого образца алевролита. Степень водонасыщения составляла 15 и 41 % от максимального количества влаги в водонасыщенном состоянии, составившем, в свою очередь, 1,6 % по отношению к массе образца в воздушно-сухом состоянии. Обращает на себя внимание то, что значения модуля упругости влажных образцов очень близки, а коэффициенты Пуассона практически совпали. То есть изменение влажности образца в данном диапазоне слабо влияет на его упругие свойства по сравнению с воздушно-сухим состоянием. Это свидетельствует о существенно нелинейном поведении упругих характеристик материала в зависимости от влагосодержания.

Для исследования влияния влажности на изменение упругих свойств горных пород образец насыщали в ванне с водой до максимального уровня, затем его извлекали из ванны, устанавливали экстензометры и помещали образец на испытательную машину. 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 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.

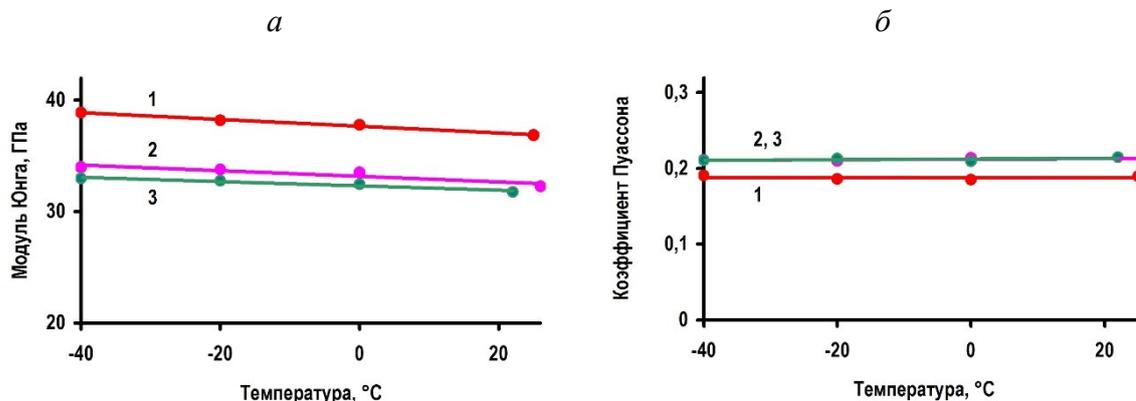


Рис. 7 – Зависимости модуля Юнга (а) и коэффициента Пуассона (б) образца алевролита от температуры

На рис. 8 приведены графики изменения модуля Юнга 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. Такое поведение модуля Юнга и коэффициента Пуассона было отмечено и на некоторых образцах алевролита.

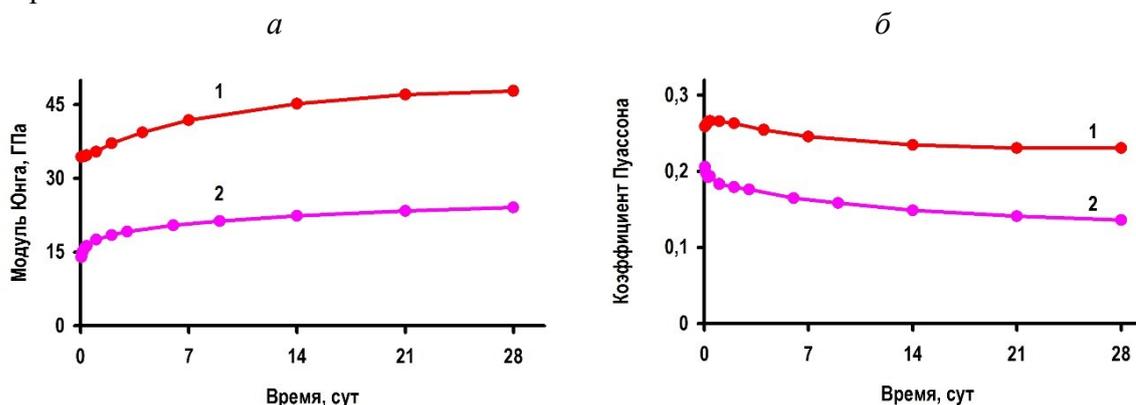


Рис. 8 – Зависимости модуля Юнга (а) и коэффициента Пуассона (б) известняка (1) и алевролита (2) от времени высыхания

На рис. 9 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 окончании цикла испытаний. Там же приведены графики относительного уменьшения избыточной (по сравнению с воздушно-сухим состоянием) влаги в образцах. Максимальная влажность образцов составила: известняка – 1,6 %, алевролита – 4,4 %.

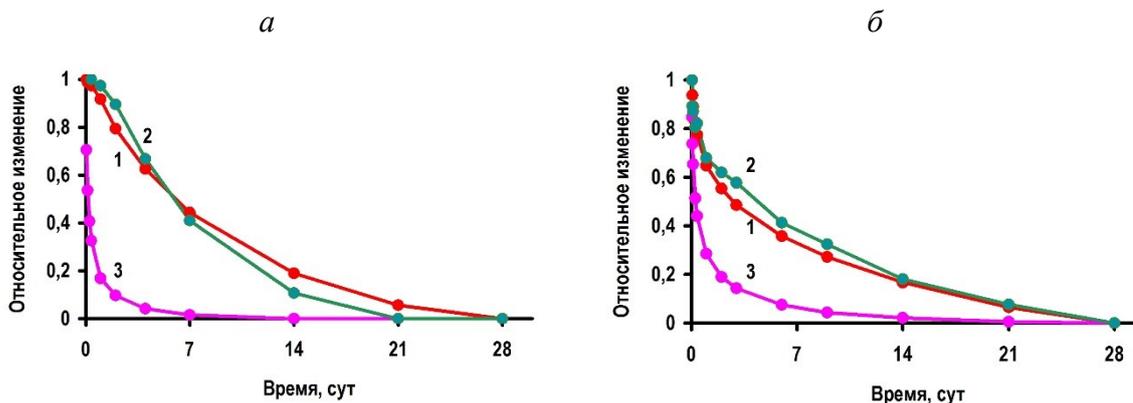


Рис. 9 – Относительное изменение модуля Юнга (1), коэффициента Пуассона (2), влажности (3) известняка (а) и алевролита (б) от времени высыхания

Приведенные на рис. 9 графики позволяют произвести сравнение скоростей изменения влажности образцов и их упругих характеристик. Как видно из рис. 9, восстановление упругих свойств происходит гораздо медленнее, чем процесс высыхания образцов. В результате модуль Юнга и коэффициент Пуассона изменяются медленно (относительно скорости высыхания образцов) при высоких уровнях водонасыщения, и достаточно быстро при низких уровнях водонасыщения, когда скорость изменения влажности образцов мала. Это подтверждает сделанный выше вывод о том, что изменение упругих свойств горных пород в зависимости от их влажности носит существенно нелинейный характер.

Заключение

В соответствии с разработанным стандартом организации СТО 05282612-001-2013 выполнены исследования статических упругих характеристик (модуль упругости, коэффициент Пуассона) вмещающих пород (известняк, алевролит) трубы «Ботуобинская» различной влажности в диапазоне изменения температуры испытания (от +20°C до -40°C), характерном для условий криолитозоны, в которой расположены алмазные месторождения Якутии. В результате проведенных исследований установлено:

1. С понижением температуры при переходе материала из талого в мерзлое состояние модуль упругости исследованных образцов горных пород линейно возрастает, в то время как коэффициент Пуассона сохраняет постоянное (в пределах погрешности эксперимента) значение. Скорость возрастания модуля упругости алевролита с понижением температуры составила от 0,017 до 0,038 ГПа / град., известняка – от 0,031 до 0,149 ГПа / град.

2. С увеличением влажности образцов наблюдается снижение модуля упругости и повышение коэффициента Пуассона во всем температурном диапазоне. При этом поведение упругих характеристик качественно не изменяется: сохраняются скорость возрастания модуля упругости с понижением температуры и постоянство коэффициента Пуассона в исследованном температурном диапазоне.

3. Изменение упругих свойств горных пород в зависимости от их влажности носит существенно нелинейный характер. Модуль Юнга и коэффициент Пуассона быстро изменяются при низких уровнях водонасыщения и достаточно медленно при высоких уровнях водонасыщения.

Литература

1. Heap M.J., Faulkner D.R. Quantifying the evolution of static elastic properties as crystalline rock approaches failure // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2008. – Vol. 45, No. 4. – P. 564 – 573.

2. Jaeger C. Rock mechanics and engineering. – Cambridge: Cambridge University Press, 1979. – 523 p.
3. Hoek E., Diederichs M.S. Empirical estimation of rock mass modulus // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2006. – Vol. 43, No. 2. – P. 203–215.
4. Sonmez H., Gokceoglu C., Nefeslioglu H.A., Kayabasi A. Estimation of rock modulus: For intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2006. – Vol. 43, No. 2. – P. 224–235.
5. Gercek H. Poisson's ratio values for rocks // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2007. – Vol. 44, No. 1. – P. 1–13.
6. ГОСТ 28985-91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 2004. – 11 с.
7. 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.
8. Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., Read R.S. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock // Can. Geotech. J. – 1998. – Vol. 35, No. 2. – P. 222 – 233.
9. 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.
10. Сукнёв С.В. Методика определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона при изменении температуры образца / С.В. Сукнёв // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 8. – С. 101 – 105.
11. Сукнёв С.В. Определение статических упругих свойств горных пород при изменении температуры / С.В. Сукнёв // ФТПРПИ. – 2016. – № 2. – С. 161 – 171.
12. Сукнёв С.В. Опыт разработки и применения стандарта организации для определения упругих свойств горных пород / С.В. Сукнёв // Горный журнал. – 2015. – № 4. – С. 20 – 25.
13. Сукнёв С.В. Определение статического модуля упругости и коэффициента Пуассона горных пород при изменении температуры образца / С.В. Сукнёв // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 10. – С. 183 – 188.