

DOI: 10.26896/1028-6861-2017-83-12-52-57

УДК (UDC) 620.172.22:622.023.25

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ СЖАТИИ¹

© Сергей Викторович Сукнёв

Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, г. Якутск, Россия; e-mail: suknyov@igds.ysn.ru

Статья поступила 26 июля 2016 г.

Проведен анализ стандартных методов лабораторного определения модуля упругости горных пород при одноосном сжатии, отмечены их преимущества и недостатки. Разработаны метод и стандарт организации, позволяющие физически корректно определять статические упругие свойства горных пород при изменении их состояния (температура, влажность). Испытание проводится путем многократного нагружения образца в диапазоне малых обратимых деформаций. Перед испытаниями образец обязательно уплотняют (два цикла нагружения). На последующих циклах проверяют условия обратимости и линейности деформаций, затем их измеряют. Приведены примеры определения модуля упругости алевролитов вмещающих пород на месторождении алмазов трубки «Ботубинская» в зависимости от температуры и влажности.

Ключевые слова: горные породы; сжатие; модуль упругости; низкие температуры; влажность.

DETERMINATION OF THE MODULUS OF ELASTICITY OF ROCKS UPON COMPRESSION

© Sergei V. Suknev

N. V. Chersky Institute of Mining of the North SB RAS, Yakutsk, Russia; e-mail: suknyov@igds.ysn.ru

Submitted July 26, 2016.

The standard methods of laboratory determination of the elasticity modulus of rocks under uniaxial compression are analyzed and their advantages and shortcomings are discussed. A test method and internal standard which enable physically correct determination of the static elastic properties of rocks upon change in their condition (temperature, moisture) are developed. Testing includes multiple loading of the specimen within the range of low reversible strains. The test is preceded by compulsory pre-compaction (2 loading cycles). Conditions of the reversibility and linearity of deformations are checked in subsequent cycles. The examples of determining the elasticity moduli of the siltstones of enclosing rocks from the «Botubinskaya» diamond deposit as a function of their temperature and moisture are presented.

Keywords: rock; compression; modulus of elasticity; low temperatures; moisture.

Упругость — фундаментальное физическое свойство горных пород, определяющее их механическое поведение [1]. Модуль упругости (модуль Юнга) используют в качестве важнейшего параметра при анализе деформаций породного массива и проектировании объектов горного строительства, таких как тоннели, подземные выработки, откосы, фундаменты [2 – 4].

Типичные диаграммы деформирования горных пород при одноосном сжатии состоят из четырех характерных участков (рис. 1). Первый участок (I) характеризует закрытие изначально присутствующих в образце микротрещин, второй (II) — упругое деформирование материала, третий (III) — начало образования новых трещин в образце, четвертый (IV) — нестабильное трещинообразование, которое завершается полным разрушением образца. Модуль упругости

материала следует определять на втором участке диаграммы деформирования. Нагружение образца за пределом упругости сопровождается накоплением повреждений, трещин, изменением структуры порового пространства и приводит к изменению его физико-механических свойств. При этом нарушается принцип обратимости: материал не возвращается в исходное состояние после снятия нагрузки даже при неизменных условиях испытания.

В настоящее время в России для определения деформационных характеристик горных пород при одноосном сжатии используют ГОСТ 28985–91 [5]. Введенный в действие в 1992 г. стандарт был переиздан без изменений в 2004 г. и получил статус межгосударственного стандарта для стран СНГ. В соответствии с ним модуль упругости материала определяют при разгрузке образца после его нагружения до определенного уровня, который должен быть не ниже 50 % от предела прочности материала при одноосном сжатии. Поскольку для большинства горных пород необрати-

¹ Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований СО РАН (проект VIII.74.5.1) и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-45-05014).

мые структурные изменения, связанные с процессами образования новых трещин, начинаются при напряжениях, составляющих 30 – 50 % от предела прочности материала при одноосном сжатии [6 – 8], применение стандарта [5] для определения упругих свойств горных пород физически некорректно.

Кроме того, из-за необратимых структурных изменений невозможно повторное испытание образца, что не позволяет проследить за изменением упругих характеристик материала вследствие изменения его состояния, например, при понижении температуры. Это важно знать для проектирования горных сооружений в условиях криолитозоны или применения геотехнологий, предусматривающих замораживание породного массива. При каждой температуре необходимо проводить испытание нового образца, что не только трудно, но и некорректно с точки зрения постановки экспериментального исследования. Необходимо также отметить, что стандарт не распространяется на мерзлые горные породы.

За рубежом упругие свойства горных пород при одноосном сжатии определяют преимущественно по международному стандарту ASTM D7012-10 [9]. Согласно ему модуль Юнга (модуль упругости) рассчитывают по наклону диаграммы деформирования одним из трех способов (рис. 2, а – в соответственно):

по тангенсу угла наклона диаграммы в определенной точке (обычно при уровне напряжений, составляющем 50 % от предела прочности материала при одноосном сжатии);

по наклону более или менее линейного участка диаграммы, для аппроксимации которого используют при необходимости метод наименьших квадратов.

по наклону секущей, которую проводят из нуля до определенной точки диаграммы.

Стандарт предоставляет выбор способа расчета модуля Юнга, а также диапазона напряжений, в котором производится расчет, что может привести к неоднозначному и некорректному его определению. Применение первых двух способов требует предварительной математической обработки (сглаживания и аппроксимации) исходных данных, что существенно ус-

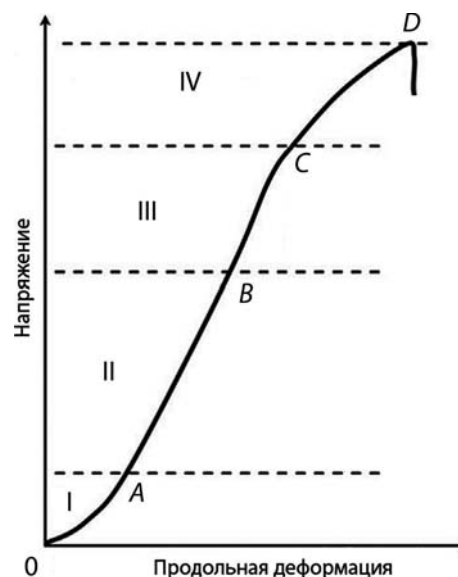


Рис. 1. Характерные участки диаграммы деформирования горной породы

ложняет процедуру вычислений. Более практичным является третий способ (см. рис. 2, в). Для его применения необходимо знать только значение измеренной деформации при определенном уровне нагружения образца. Однако в стандарте не указывается, до какой точки диаграммы необходимо проводить секущую, чтобы не попасть в область нелинейных деформаций при высоких уровнях нагружения (см. рис. 1, участки III и IV). В нем также не сообщается, каким образом при таком способе расчета следует учитывать нелинейность диаграммы на начальном участке (см. рис. 1, участок I).

Стандарт DIN EN 14580 [10] (принятый в 2005 г. и имеющий статус межгосударственного стандарта для стран ЕС), в отличие от стандарта ASTM D7012-10, содержит четкие указания по поводу диапазона измерения деформаций для определения модуля упругости. Нижнее напряжение σ_u (см. рис. 1, точка A) составляет 2 %, а верхнее σ_0 (точка B) — 33 % от пре-

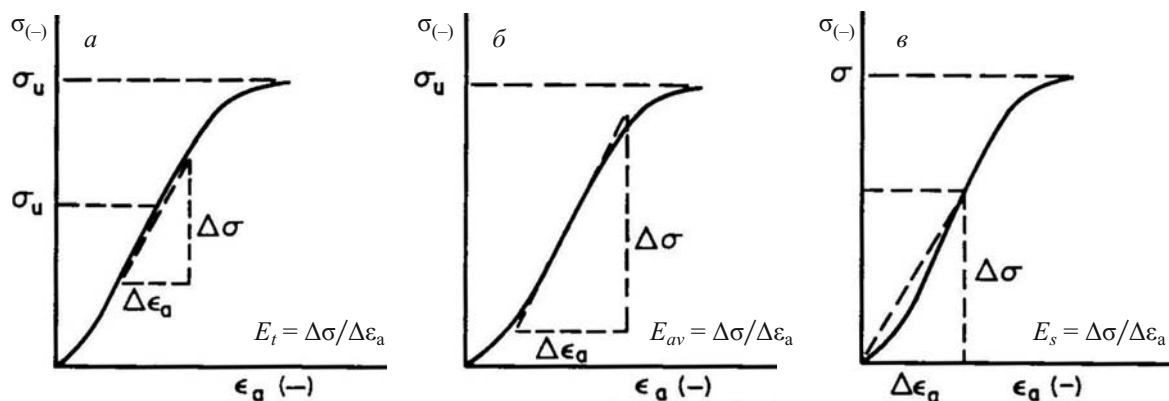


Рис. 2. Диаграммы напряжение — продольная деформация для определения модуля Юнга [9]



Рис. 3. Испытательная машина UTS 250 с температурной камерой

дела прочности материала при одноосном сжатии. Модуль упругости

$$E = \frac{\sigma_0 - \sigma_u}{(\varepsilon_a)_0 - (\varepsilon_a)_u}, \quad (1)$$

где $(\varepsilon_a)_u$ и $(\varepsilon_a)_0$ — измеренные продольные деформации при нижнем и верхнем напряжениях соответственно.

Еще одним существенным отличием стандарта DIN EN 14580 является обязательное уплотнение образца перед проведением измерений. Для этого его дважды подвергают нагружению до верхнего напряжения σ_0 с последующей разгрузкой до нижнего σ_u . Деформации измеряют только на третьем цикле нагружения. Предварительное уплотнение необходимо для получения стабильных деформационных характеристик материала. Соблюдение этих требований обеспечивает обратимое упругое деформирование образца во время испытания, что важно для проведения корректного исследования модуля упругости при изменении состояния материала.

Вместе с тем большой опыт, накопленный при проведении испытаний вмещающих пород алмазных месторождений Якутии, показывает, что только для крепких пород, характеризующихся низкой пористостью и находящиеся в воздушно-сухом состоянии, упругий участок начинается при напряжениях, лежащих ниже установленного DIN EN 14580 значения σ_u . Для пород с более высокой пористостью, а также влажных начальный нелинейный участок диаграмм деформирования распространяется до напряжений, значительно превышающих это значение. Кроме того,

ни стандартом DIN EN 14580, ни тем более стандартами ГОСТ 28985–91 и ASTM D7012-10 не предусмотрено проведение испытаний и определение упругих свойств материала непосредственно в процессе изменения его состояния.

С учетом этого в соответствии с ГОСТ Р 1.0–2004 [11], ГОСТ Р 1.4–2004 [12] и ГОСТ Р 1.5–2004 [13] был разработан стандарт организации СТО 05282612-001–2013 «Метод определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона горных пород при одноосном сжатии призматических образцов», позволяющий физически корректно определять упругие характеристики горных пород, в том числе при изменении их температуры и влажности. Стандарт состоит из девяти разделов, в которых указаны область применения, метод испытания, условия испытания, приведены требования к подготовке образцов и безопасности при проведении испытания, описаны используемое испытательное оборудование, средства измерений, процедуры проведения испытания и обработки результатов. В приложении представлен пример расчета модуля упругости и коэффициента Пуассона. Стандарт утвержден и введен в действие приказом директора ИГДС СО РАН.

Для испытания образцов горных пород используют следующее оборудование: испытательный пресс ToniNORM с блоком измерительной и управляющей электроники ToniTROL (фирма Toni Technik, Германия) и электромеханическую универсальную испытательную машину UTS 250 с блоком измерительной и управляющей электроники testControl (фирма Zwick, Германия). Машина UTS 250 оснащена температурной камерой для проведения испытаний в диапазоне температур от -65 до $+250$ °C (рис. 3). Для измерения деформаций используют продольные и поперечные экстензометры 0712.001 и 0712.004 фирмы Toni Technik. Испытание проводят путем многократного нагружения образца в диапазоне малых обратимых деформаций. Для определения упругих свойств нижнее напряжение принимают равным 0,5 от верхнего напряжения. При этом верхнее напряжение не должно превышать одной трети от предела прочности материала при одноосном сжатии.

Процедура определения упругих свойств горных пород при низких климатических температурах выглядит следующим образом. Образец с установленными экстензометрами помещают в температурную камеру (рис. 4) и охлаждают до заданной температуры. О достижении в образце заданной температуры судят, во-первых, по показаниям штатного датчика температуры в камере и, во-вторых, по стабилизации показаний продольного экстензометра, установленного на образце. Полагают, что заданная температура достигнута, если показания продольного экстензометра стабильны (с точностью 0,1 мкм) в течение не менее

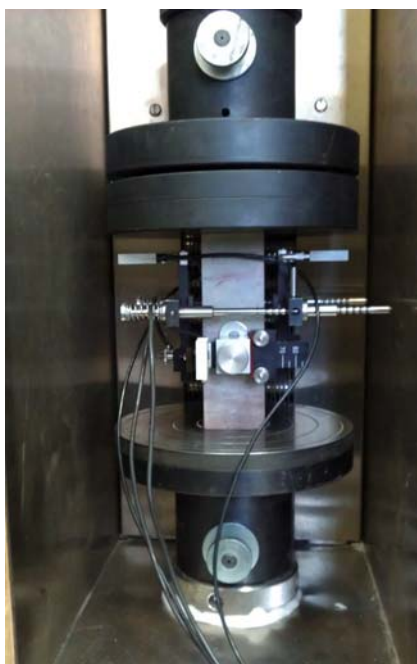


Рис. 4. Образец в температурной камере

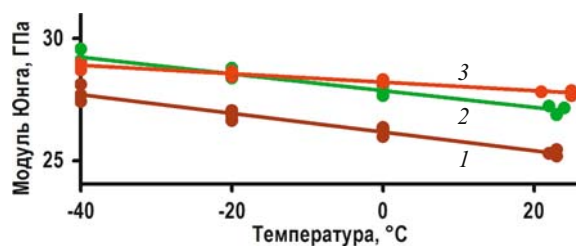


Рис. 5. Зависимости модуля Юнга алевролита от температуры для трех образцов (1 – 3 соответственно)

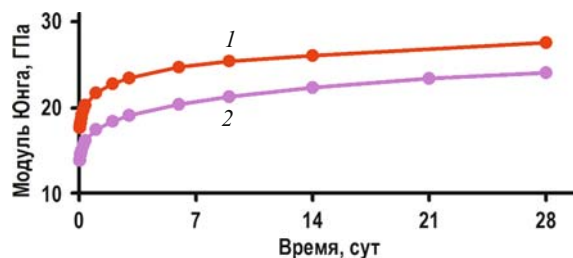


Рис. 6. Зависимости модуля Юнга алевролита от времени высушивания для двух образцов (1 и 2)

30 мин. Общее время охлаждения и выдержки образца при заданной температуре составляет 2 – 3 ч.

После охлаждения образец несколько раз подвергают циклическому нагружению со скоростью 1 МПа/с до напряжения σ_0 . Первые 1 – 2 цикла необходимы для предварительного уплотнения образца перед измерением деформаций. На последующих циклах проверяют условия обратимости и линейности деформаций и измеряют их. Для расчета модуля упругости и коэффициента Пуассона используют средние значения деформаций, измеренные на последующих циклах нагружения, что позволяет повысить точность измерения малых деформаций и, соответственно, определения упругих свойств материала. В процессе испытания с интервалом 0,1 с регистрируют изменение базы продольного и поперечного экстензометров и определяют соответствующие деформации образца. Модуль упругости рассчитывают по формуле (1). Затем образец охлаждают (или нагревают) до новой температуры и повторяют испытание.

Для исследования влияния влажности на изменение упругих свойств образец предварительно погружают в ванну с водой. Затем образец с установленными экстензометрами помещают на испытательную машину. Испытания проводят через определенные промежутки времени в процессе естественного высыхания образца при комнатной температуре. Влажность оценивают по диаграммам водонасыщения и водопотери.

Разработанный метод использовали для определения упругих свойств вмещающих пород алмазных месторождений Якутии при изменении температуры и влажности. В качестве примера приведем резуль-

таты испытаний образцов алевролита (трубка «Ботубинская»).

Образцы в воздушно-сухом состоянии (высушенные на воздухе при комнатной температуре) испытывали (каждый образец — три раза) в диапазоне температур от +20 до –40 °C. На рис. 5 приведены зависимости модуля Юнга образцов от температуры. Для предотвращения образования конденсата на поверхности образца обеспечивали его гидроизоляцию. Влажность (вес) образца контролировали как перед испытанием, так и после него. Повторное испытание проводили спустя несколько дней после предыдущего, убедившись в стабилизации воздушно-сухого состояния образца. Повторяемость результатов определения модуля Юнга составила выше 99 %. С понижением температуры модуль упругости образцов линейно возрастает со скоростью от 0,017 до 0,038 ГПа/град.

Влажные образцы испытывали при комнатной температуре. На рис. 6 показано изменение модуля Юнга в процессе высыхания образцов. Видно, что модуль Юнга алевролита монотонно увеличивается с потерей влаги образцом. Наиболее интенсивно он изменяется в первые сутки, а затем стабилизируется по мере высыхания образца. Наименьший модуль упругости материал имеет в водонасыщенном состоянии, наибольший — в воздушно-сухом состоянии, которое достигается по окончании цикла испытаний.

Имея диаграммы водопотери образцов, можно построить зависимости модуля упругости от влажности. Важно знать, как сильно изменяются упругие свойства при низких и умеренных уровнях водонасыщения.

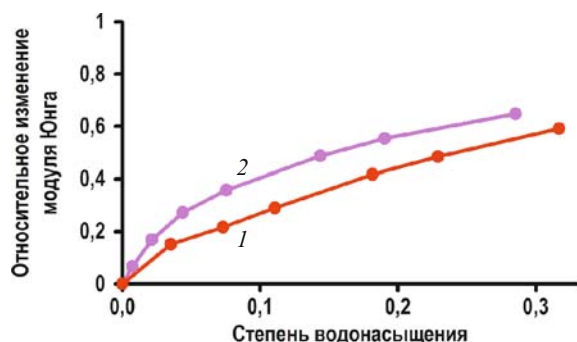


Рис. 7. Относительные изменения модуля Юнга алевролита в зависимости от степени водонасыщения для двух образцов (1 и 2)

На рис. 7 приведены зависимости модуля Юнга $\overline{\Delta E}$ от степени водонасыщения образцов η :

$$\overline{\Delta E} = \frac{E_{wet} - E_{dry}}{E_{sat} - E_{dry}}, \quad \eta = \frac{P_{wet} - P_{dry}}{P_{sat} - P_{dry}},$$

где E_{wet} , E_{dry} , E_{sat} и P_{wet} , P_{dry} , P_{sat} — модуль Юнга и вес образца во влажном, воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии соответственно.

Изменение модуля упругости алевролита в зависимости от влажности носит нелинейный характер. При низких уровнях водонасыщения модуль упругости уменьшается быстрее, чем в воздушно-сухом состоянии: до 50 % от максимального изменения, которое достигается в водонасыщенном состоянии.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. На основе проведенного анализа методов определения упругих свойств горных пород при одноосном сжатии показано, что применение действующего ГОСТ 28985–91 физически некорректно. В наибольшей степени требованиям физической корректности отвечает стандарт DIN EN 14580, в котором обеспечивается обратимое упругое деформирование образца во время испытания. Вместе с тем отмечено, что стандартами DIN EN 14580, ГОСТ 28985–91 и ASTM D7012-10 не предусмотрено проведение испытаний и определение упругих свойств материала непосредственно в процессе изменения его состояния (температуры, влажности).

2. В соответствии с ГОСТ Р 1.0–2004, ГОСТ Р 1.4–2004 и ГОСТ Р 1.5–2004 разработан стандарт организации СТО 05282612-001–2013 «Метод определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона горных пород при одноосном сжатии призматических образцов», позволяющий физически корректно определять упругие характеристики горных пород, в частности, при изменении их температуры и влажности. Это имеет важное практическое значение для проектирования горных сооружений в криолитозоне и применения геотехнологий с замораживанием породного массива.

3. Согласно разработанному стандарту организации определены упругие свойства вмещающих пород алмазных месторождений Якутии. Отмечено, что с понижением температуры модуль упругости образцов алевролита (трубка «Ботуобинская») линейно возрастает со скоростью от 0,017 до 0,038 ГПа/град в диапазоне температур от +20 до –40 °С. Изменение модуля упругости алевролита в зависимости от влажности носит нелинейный характер. Наиболее быстрое его уменьшение (по сравнению с воздушно-сухим состоянием) происходит при низких 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. N. 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. N 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. N 2. P. 224 – 235.
5. ГОСТ 28985–91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. — 11 с.
6. **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. N 6. P. 643 – 659.
7. **Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., Read R. S.** Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock / *Can. Geotech. J.* 1998. Vol. 35. N 2. P. 222 – 233.
8. **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. N 1. P. 14 – 46.
9. ASTM D7012-10. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. — West Conshohocken: ASTM International, 2010.
10. DIN EN 14580:2005–07. Prüfverfahren für Naturstein — Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls. — Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2005.
11. ГОСТ Р 1.0–2004. Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения. — М.: Стандартинформ, 2007. — 12 с.
12. ГОСТ Р 1.4–2004. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения. — М.: Стандартинформ, 2007. — 8 с.
13. ГОСТ Р 1.5–2004. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила построения, изложения, оформления и обозначения. — М.: Стандартинформ, 2007. — 35 с.

REFERENCES

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. N. 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. N 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. N 2. P. 224 – 235.
5. RF State Standard GOST 28985–91. Rocks. Method for determination of deformation characteristics under uniaxial compression. — Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2004. — 11 p. [in Russian].
6. **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. N 6. P. 643 – 659.
7. **Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., Read R. S.** Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock / *Can. Geotech. J.* 1998. Vol. 35. N 2. P. 222 – 233.
8. **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. N 1. P. 14 – 46.
9. ASTM D7012-10. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. — West Conshohocken: ASTM International, 2010.
10. DIN EN 14580:2005–07. Prüfverfahren für Naturstein — Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls. — Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2005.
11. RF State Standard GOST R 1.0–2004. Standardization in the Russian Federation. Basic provisions. — Moscow: Standartinform, 2007. — 12 p. [in Russian].
12. RF State Standard GOST R 1.4–2004. Standardization in the Russian Federation. Standards of organizations. General. — Moscow: Standartinform, 2007. — 8 p. [in Russian].
13. RF State Standard GOST R 1.5–2004. Standardization in the Russian Federation. National standards of the Russian Federation. Rules of structure, drafting, presentation and indication. — Moscow: Standartinform, 2007. — 35 p. [in Russian].