



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК В Г. БИШКЕКЕ (НС РАН)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР -
ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН (МНИЦ - ГП)

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ**



**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ
В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ

**18 - 20 апреля 2018 года
г. Бишкек**



УДК 001
ББК 30.6
С56

Ответственные редакторы:

Забинякова О.Б., Матюков В.Е., Имашев С.А.

Редакционная коллегия:

Лашин О.А., Чешев М.Е., Лисимов М.О., Саламатина Ю.М., Непеина К.С.

**С56 Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сб. материалов
X Междунар. конф. молодых ученых и студентов.** – Бишкек: НС РАН, 2018. – 430 с.

ISBN 978-9967-12-728-9

В данный сборник включены материалы X Международной конференции молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях», которая была проведена Научной станцией РАН и Международным научно-исследовательским центром – геодинамическим полигоном в г. Бишкеке, Кыргызская Республика. В сборнике представлены работы молодых ученых и студентов из Кыргызстана, Узбекистана, Казахстана, Таджикистана и России, охватывающие исследования в области мониторинга геосреды, физики и механики горных пород, оценки сейсмического и геологического риска, математического моделирования различных процессов и других научных направлений.

Сборник может быть полезен студентам, аспирантам и специалистам, занимающимся исследованиями в области наук о Земле, механики и прикладной математики.

Издание сборника материалов конференции и иной печатной продукции осуществлялось при финансовой поддержке Федерального агентства научных организаций (субсидия № 007-02-2018-653)

Утверждено к печати Ученым советом
ФГБУН НС РАН в г. Бишкеке

УДК 001
ББК 30.6

С 2001000000-18
ISBN 978-9967-12-728-9

©ФГБУН Научная станция РАН в г. Бишкеке

©Международный научно-исследовательский
центр - геодинамический полигон в г. Бишкеке

© Коллектив авторов, 2018

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГРАММ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ НЕ ОПАСНОГО ПО ВЫБРОСАМ ПЕСЧАНИКА ПРИ ТРЁХОСНОМ СЖАТИИ

Степанова Ю.Ю.

stepanova_yulya_1995@mail.ru

Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызская Республика

Научный руководитель:

*Профессор кафедры механики Кыргызско-Российского Славянского университета,
д.ф.-м.н. Рычков Б.А.*

Аннотация. Рассмотрены экспериментальные данные А.Н. Ставрогина по трехосному сжатию цилиндрических образцов песчаника, не опасного по выбросам, при пропорциональном нагружении по схеме Т. Кармана. Песчаники обладают достаточно высокой пористостью в исходном состоянии. Поэтому на диаграмме продольной и поперечной деформации в пределах упругости наблюдаются определенные нелинейные участки, что связывается с происходящим на этих участках уплотнением материала. Это обстоятельство вызывает определенное затруднение при определении упругих констант материала. Предлагается способ корректировки исходных диаграмм деформации в диапазоне изменения осевого напряжения, в котором заканчивается процесс уплотнения материала. В результате уточняется методика определения модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

Ключевые слова: трехосное сжатие, уплотнение материала, обобщенный закон Гука, учет нелинейности диаграммы деформации, тензор деформаций.

Введение. При трехосном сжатии цилиндрических образцов горных пород вычисляются главные напряжения ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) и измеряются осевая $\varepsilon_1(\sigma_1)$ и поперечная (ε_2) деформации, наблюдаемые при испытании по схеме Т. Кармана ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$). На диаграмме для продольной осевой деформации ($\sigma_1 \sim \varepsilon_1$) наблюдается (особенно) для песчаников начальный нелинейный участок [1,2], после которого следует практически линейный участок этой диаграммы вплоть до условного предела упругости. Как на этом участке использовать зависимость $\varepsilon_1(\sigma_1)$ для определения упругих констант материала, до сих пор не существует единого мнения [1,3,4]. Некоторые исследователи [3,5] считают, что наклон такой кривой «напряжение - деформация» определяет модуль упругости Юнга. При этом подчеркивают, что численное значение модуля зависит от напряжения, а при последовательном нагружении и разгрузке образца породы модуль зависит и от цикла испытания, так как указанные кривые при нагружении и разгрузке не совпадают между собой. Иначе говоря, утверждается, что на отмеченном нелинейном участке диаграммы происходит упругая деформация. Аналогичное утверждение относится и к определению коэффициента Пуассона. Другие экспериментаторы [1,4] предлагают исключать из рассмотрения такой начальный участок, а упругие параметры породы определять при более высоких уровнях напряжения, когда зависимость «напряжение - деформация» становится близкой к линейной. Однако до сих пор нет общепринятой методики определения упругих констант пород даже при пропорциональном нагружении. В этом направлении проводятся многочисленные экспериментальные исследования и даются различные теоретические интерпретации [6,7,8,9,10].

В настоящем сообщении сделана попытка устранить указанное выше противоречие в этом вопросе и разработать методику определения упругих параметров не опасного по

выбросам (НВО) песчаника на основе предлагаемой корректировки исходных [1] экспериментальных диаграмм деформации.

Анализ криволинейного участка продольной деформации. Вид напряженного состояния характеризуется параметром $C = \sigma_2 / \sigma_1$. Начиная с определенного уровня осевого напряжения $\sigma_{1н}$ (характерного для каждого C) можно выделить линейный участок диаграммы деформации $\varepsilon_1(\sigma_1)$ вплоть до условного предела упругости $\sigma_{1у}$. Как указано в [1], $\sigma_{1н} = (0,05 \div 0,15)\sigma_{1у}$. На рисунке 1 представлены диаграммы продольной и поперечной деформации не опасного по выбросам песчаника для всех осуществленных видов напряженного состояния.

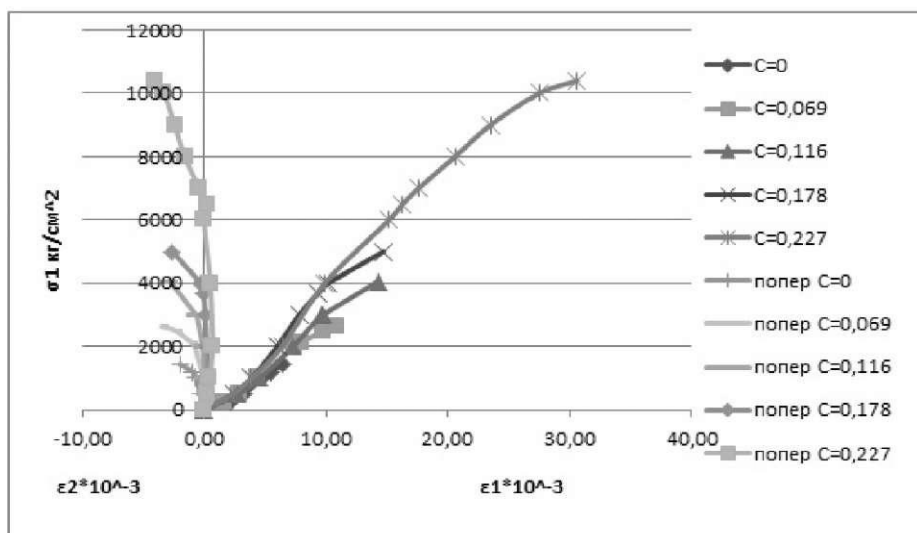


Рисунок 1 - Диаграммы $\varepsilon_1(\sigma_1)$ и $\varepsilon_2(\sigma_1)$ для НВО песчаника

Рассмотрим, например, диаграмму продольной деформации этой горной породы при одноосном сжатии. Аппроксимация с помощью линии тренда (линейной зависимостью) квазилинейного установившегося участка деформации и продолжение этой линии тренда до нулевого напряжения доставляет новое начало координат (точка ε_1^0 на рисунке 2) для отсчета упругой деформации вплоть до предела упругости (достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9993$).

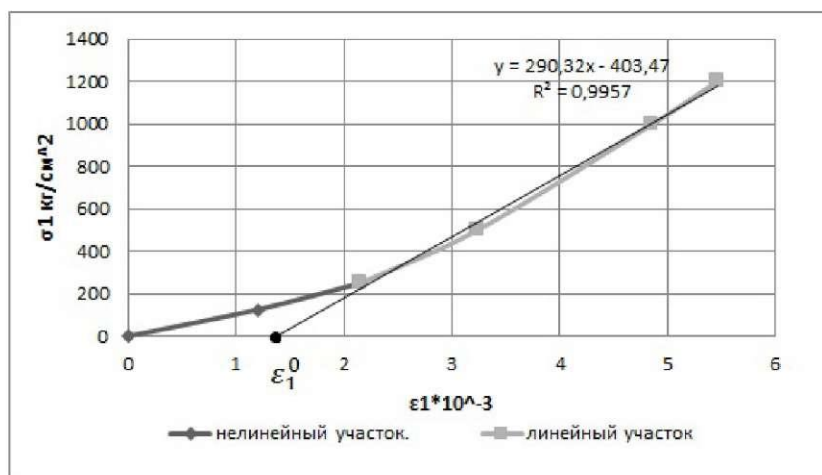


Рисунок 2 - Диаграмма упругой деформации $\varepsilon_1(\sigma_1)$ для песчаника не опасного по выбросам при одноосном сжатии

Установлено, что, определяемое таким образом, это начало координат оказывается практически одним и тем же для всех рассматриваемых видов напряженного состояния данной горной породы. Среднее значение $(\varepsilon_1^0)_{cp} = 1,52 * 10^{-3}$. Отклонение от этого значения при разных видах напряженного состояния определялось по формуле:

$$\varepsilon_1^0 = \frac{\varepsilon_1^0 - (\varepsilon_1^0)_{cp}}{(\varepsilon_1^0)_{cp}} * 100\%, \quad (1)$$

и представлено в Таблице 1.

Таблица 1 - Отклонение от среднего значения при разных видах напряженного состояния

C	$\varepsilon_1^0 * 10^{-3}$	$\Delta \varepsilon_1^0, \%$
0	1,39	-8,4
0,069	1,37	-9,9
0,116	1,69	11,2
0,178	1,56	2,8
0,227	1,58	4,4

Таким образом, при определении модуля Юнга устраняется из рассмотрения начальная нелинейная деформация, наблюдаемая при нагружении цилиндрических образцов песчаников из исходного состояния. Эта начальная деформация не является чисто упругой деформацией [2,6], а содержит также деформацию уплотнения (как правило, пористость таких песчаников составляет 6 -7% [1]).

На рис.3. приведена расчетная диаграмма продольной деформации для не опасного по выбросам песчаника (обозначенная на рисунке с помощью маркеров треугольниками), которая построена по значению модуля $(E = 2,7 * 10^5 \frac{кгс}{см^2})$, определенного авторами эксперимента [11]. На самом деле эта диаграмма должна исходить не из исходного начала координат, а из точки А (точка на пересечении исходного криволинейного и расчетного линейного участка диаграммы), а затем продолжена до точки В. Этой оговорки в [1] не было сделано; кроме того не указано, как сравнивать расчетные и экспериментальные данные при других видах напряженного состояния. Эта неопределенность исключается, если во всех случаях трехосного сжатия использовать установленное новое начало координат (точка В на рисунке 3).

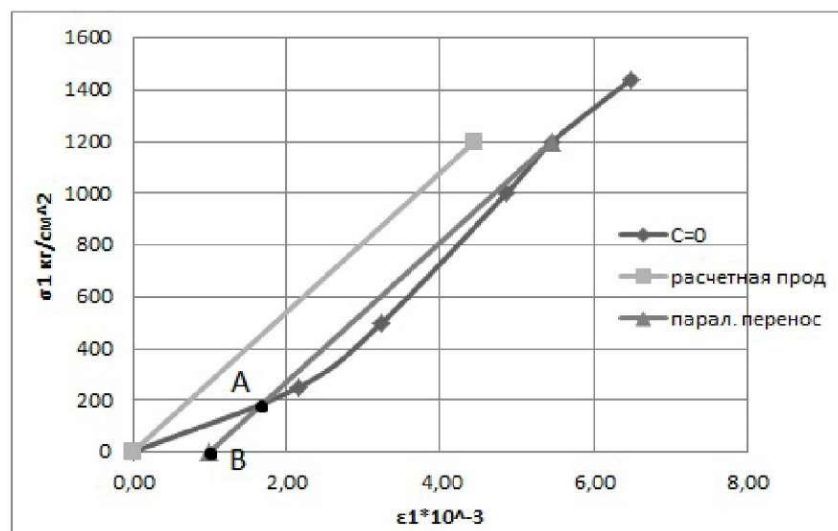


Рисунок 3 - К определению модуля Юнга по схеме А.Н. Ставрогина.

Пример обработки диаграммы поперечной деформации. Для поперечной деформации при тех же напряженных состояниях (при которых наблюдается установившийся участок продольной деформации) происходит некоторое запаздывание установившегося участка этой деформации. Если на диаграмме для поперечной деформации выделить участок, на котором с ростом уровня осевого сжимающего напряжения каждое последующее значение деформации по модулю больше предыдущего, то аппроксимация этого участка линейной зависимостью (с привязкой к установленному новому началу координат) также происходит с достаточной достоверностью. Исключение составляет диаграмма поперечной деформации при одноосном сжатии: эта диаграмма является практически линейной вплоть до условного предела упругости (рисунок 4).

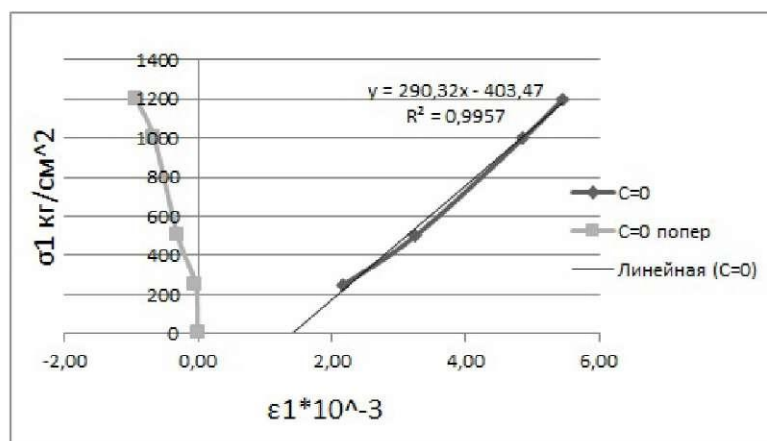


Рисунок 4 - Аппроксимация диаграммы деформации НВО песчаника при одноосном сжатии

Поэтому выделенный на диаграмме $\varepsilon_2(\sigma_1)$ линейный участок до условного предела упругости сохраняет ту же самую разность отсчитываемых деформаций, если весь участок поперечной деформации перенести в новое установленное начало координат параллельно его исходному состоянию. С меньшей, но достаточно приемлемой точностью, такая же картина наблюдается и при пропорциональном нагружении для $C = 0,069$, начиная с участка устойчивого роста по модулю значения приращения поперечной деформации. Таким способом (с учетом изложенного выше) устраняется неопределенность выделения установившегося упругого участка как продольной, так и поперечной деформации при произвольном виде напряженного состояния.

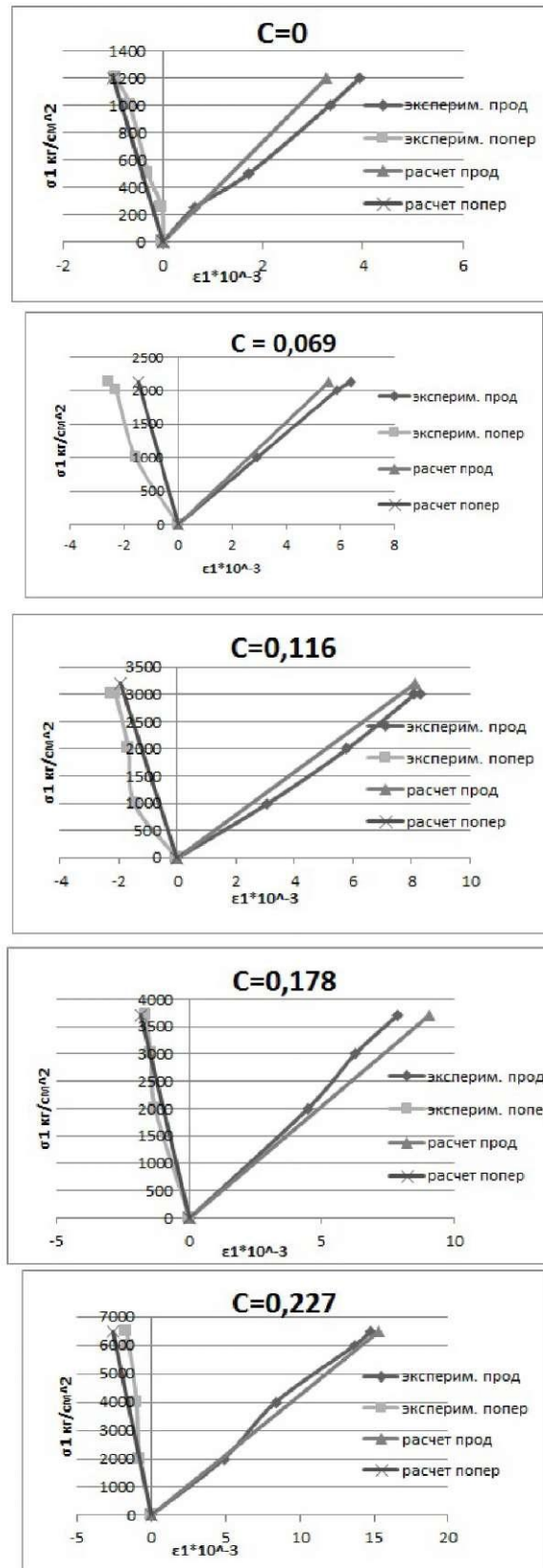
Определение упругих констант на основе преобразованных (скорректированных) диаграмм деформаций. Обобщенный закон Гука представляется в виде:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E}(1 - 2C\nu), \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma_1}{E}(C - \nu(1 + C)), \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_2 \quad (2)$$

По аппроксимированным (вышеуказанным образом) участкам поперечной и продольной деформации определялись упругие константы (модуль Юнга - E и коэффициент Пуассона - ν). В качестве первого приближения (1 способ определения E и ν) были использованы диаграммы деформаций при $C = 0,116$; получено: $E = 3,4 \cdot 10^5 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$, $\nu = 0,32$.

Константы E и ν можно еще определить (2 способ) отдельно при трёх видах напряженного состояния (т.е. при трёх значениях C); найденные при этом их значения затем усреднялись ($E = 3,7 \cdot 10^5 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$, $\nu = 0,3$). Отклонение от среднего значения коэффициента ν составило +6%, -11%, а по величине E отклонение от среднего значения +8%, -14%.

Скорректированные диаграммы деформации (с учётом переноса начала координат) и последующее их отображение расчетными зависимостями представлены на рисунках 5 - 9 для всех осуществленных в опыте видов напряженного состояния (C).



Рисунки 5 - 9 - Диаграммы, исключая начальные нелинейные участки деформации.

Анализ представленной в [1,6] методики определения упругой и остаточной деформации. В [1, приложение №2] даны значения остаточной продольной деформации (ε_1^n) после достижения предела прочности и коэффициент остаточной поперечной деформации (μ_n), а в [1, приложение №1] приведены значения предельных накопленных продольной (ε_1^k) и поперечной (ε_2^k) деформаций. Эти исходные данные для двух видов напряженного состояния (С) сведены в таблицу 2. В ней указано также получаемое расчетное значение остаточной поперечной деформации ($\varepsilon_2^n = -\mu_n * \varepsilon_1^n$).

Таблица 2 – Предельные накопленные значения продольной и поперечной деформаций

С	$ \varepsilon_1^k * 10^{-3} $	$\varepsilon_2^k * 10^{-3}$	$\varepsilon_1^n \cdot 10^{-3}$	μ_n	$ \varepsilon_2^n \cdot 10^{-3} $
0,178	14,7	2,6	2,74	0,953	2,6112
0,227	30,6	4,0	5,65	0,762	4,3053

По этим исходным данным на рисунке 10 представлена полная картина упругой и остаточной деформации при $C = 0,227$.

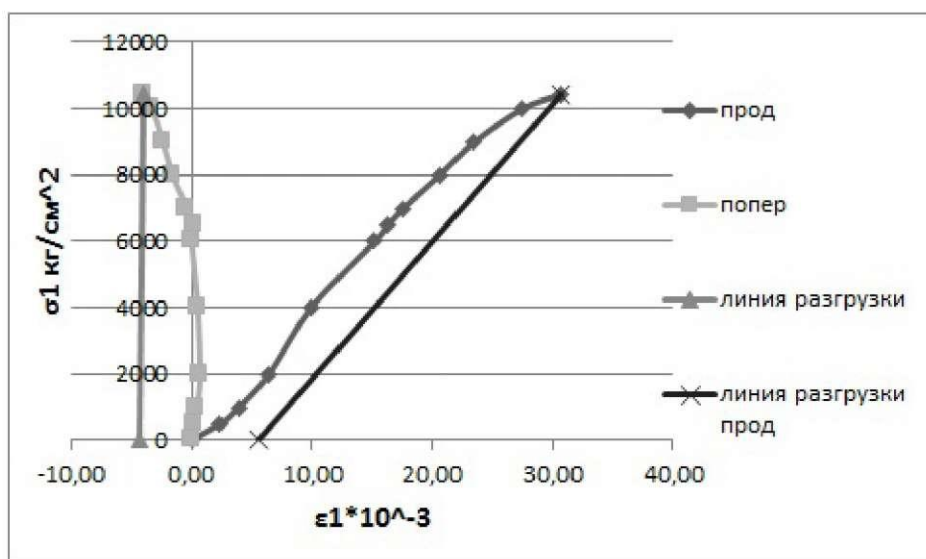


Рисунок 10 - Активное нагружение и разгрузка по схеме А.Н. Ставрогина

Здесь криволинейные диаграммы для продольной и поперечной деформации соответствуют активному нагружению до предела прочности. Линия разгрузки осевой деформации практически параллельна установившемуся линейному упругому участку.

Если построить соответствующую линию разгрузки поперечной деформации после достижения предела прочности, то получим, что при полной разгрузке значение поперечной деформации по модулю увеличивается по сравнению с ее значением, достигнутым на пределе прочности (поскольку ε_2^n больше по модулю чем ε_2^k). Такого парадокса не будет, если поперечную деформацию отсчитывать от нового начала координат, соответствующего установившемуся упругому характеру деформирования, как предложено в п.3.

Заключение. Представленный метод определения упругих констант горных пород, применительно к песчаникам, достаточно хорошо соответствует экспериментальным данным в пределах их разброса и устраняет существующую неопределенность при выделении упругого начального участка диаграммы деформации при трехосном сжатии цилиндрических образцов. Адекватное отображение упругой деформации необходимо также при моделировании [12] деформационного упрочнения за пределами упругости.

Литература

1. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Пластичность горных пород. М.: Недра, 1979. 301 с.
2. Карташев Ю.М., Матвеев Б.В., Матвеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. М.: Недра, 1979. 269 с.
3. Введение в механику скальных пород: Пер. с англ. / Под ред. Х. Бока. М.: Мир, 1983. 276 с.
4. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра, 1985. 271 с.
5. Стефанов Ю.П. Численное моделирование разрушения горных пород на примере расчета поведения образцов песчаника // ФТПРТИ. 2008. № 1. С. 73-83.
6. Paterson M.S., Wong Teng-fong. Experimental Rock Deformation - The Brittle Field. Berlin Heidelberg New York. Springer- Verlag. 2005. 348 p.
7. Kachanov M. On the effective elastic properties of cracked solids - Editor's comments // Int. J. of Fract. (Letters in fracture and micromechanics). 2007. V. 146. 295-299.
8. Китаева Д.А., Пазылов Ш.Т., Рудаев Я.И. О приложениях методов нелинейной динамики в механике материалов // Математическое моделирование систем и процессов. 2007. № 15. С. 46-70.
9. Шваб А.А. Экспериментально-аналитический метод определения характеристик квазиоднородного материала по упругопластическому анализу экспериментальных данных // Вестник СамГТУ. 2012. Вып. 2 (27). С. 65-71.
10. Zhang J.C., Zhou S.H., Xu S.H., Fang L.G. Evolution of the elastic properties of a bedded argillite damaged in cyclic triaxial tests // International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, Vol. 58, 2013, 103-110.
11. Ставрогин А.Н., Георгиевский В.С. Каталог механических свойств горных пород. 2-е изд. Л.: ВНИМИ, 1972. 267 с.
12. Рычков Б.А. О деформационном упрочнении горных пород // Известия РАН. МТТ. 1999. № 2. С. 115-124.