



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., Непейна 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

К МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ КОНСТАНТ ПЕРИДОТИТА

Кулагина М.А.

kulagina_m.a@mail.ru

Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Н. Ельцина,
г. Бишкек, Кыргызская Республика

Аннотация. Рассмотрены экспериментальные данные для перидотита, представленные в монографии К. Mogi “Experimental rock mechanics”, изданной в 2007 году. Цилиндрические образцы породы были испытаны по схеме Т. Кармана: вначале создавалось гидростатическое давление до разного уровня напряжений, после чего увеличивалась осевая нагрузка при постоянном достигнутом боковом давлении. Проанализировано напряженно-деформированное состояние указанной породы на втором этапе сложного нагружения в пределах упругости. На каждой из шести реализованных траекторий нагружения определена такая точка, которая соответствует осевому напряжению при одном и том же виде напряженного состояния, т.е. выделена расчетная траектория пропорционального нагружения. Продемонстрировано, что соответствующее экспериментальное значение приращения осевой деформации (в пределах упругости) является линейной функцией от приращения осевого напряжения. Тем самым доказана применимость обобщенного закона Гука. В итоге определены модуль Юнга и коэффициент Пуассона и показано, что они (применительно и к горным породам) действительно являются упругими константами, а не переменными величинами, как это иногда трактуется.

Ключевые слова: деформация горных пород, упругие константы, закон Гука при сложном нагружении.

Введение. Горные породы на определенной глубине в массиве находятся под действием неравномерных объемных давлений. Такое состояние в лабораторных условиях моделируется неравномерным трехосным сжатием цилиндрических образцов горных пород. В результате таких испытаний образцов разнообразных пород определяются их механические свойства [1-4, 6], которые затем используются для решения прикладных задач при разработке полезных ископаемых.

Цель данной работы – определение упругих констант перидотита (Nabe-ishi Peridotite) на основе экспериментальных данных, представленных в монографии [1].

Одним из наиболее распространенных видов испытаний образцов горных пород является испытание по схеме Т. Кармана, когда вначале создается гидростатическое давление цилиндрического образца, а затем при постоянном боковом давлении увеличивается осевое давление. В этом случае сложного нагружения (по двузвенной ломанной в пространстве напряжений) обычно фиксируется только приращение осевой деформации, вызванное приращением осевой нагрузки (соответствующей второму звену траектории нагружения). Это обстоятельство приводит к затруднению при определении упругих свойств материала, характеризующихся обобщенным законом Гука, в частности, модуля упругости. В данном сообщении последовательно рассматривается методика определения не только модуля упругости Юнга, но и коэффициента Пуассона.

Исходные данные. При реализованном в [1] нагружении измерялось (на втором этапе нагружения) только приращение осевой деформации в зависимости от приращения осевого напряжения. Эта зависимость (в оригинале) представлена в виде графиков в реальном масштабе, что дало возможность перевести данные графики в цифровой формат в виде табличных значений перидотита (Nabe-ishi Peridotite).

На представленных в монографии [1] графиках отражены приращения осевой деформации при соответствующем приращении осевого напряжения при постоянном достигнутом равномерном боковом давлении после начального гидростатического давления образца до определенной величины.

Экспериментальные данные (рис. 1) отсканированы с оригинала [1]. Как было проверено автором эксперимента, в исходном состоянии эта горная порода представляет собой изотропный материал.

С помощью программы «Chart2Digit» была проведена оцифровка этих графиков, а полученный результат использован в виде табличных значений деформаций и напряжений.

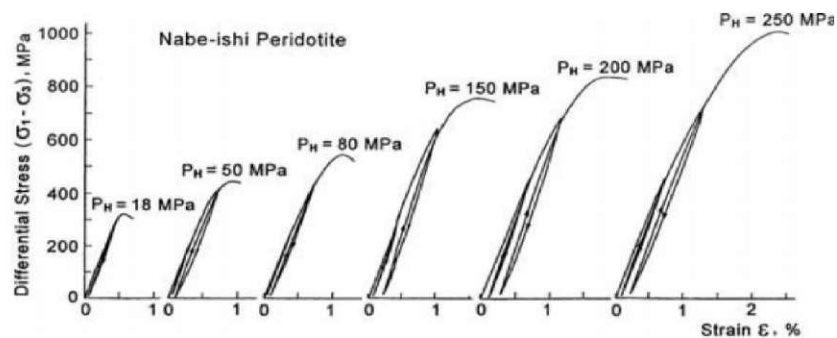


Рисунок 1 – Экспериментальные зависимости приращения напряжений - приращения деформаций для Nabe-ishi Peridotite

На рис. (1) приращение осевой деформации обозначено ε , а разность $(\sigma_1 - \sigma_3)$ между максимальным и минимальным главными напряжениями фактически означает приращение осевого напряжения, поскольку после гидростатического давления (до уровня P_H , при $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) осевое напряжение $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$ ($\sigma_2 = \sigma_3$ – напряжение от бокового давления).

Определение упругих констант. Ранее в [5] был представлен метод определения упругих констант на примере исходных экспериментальных данных для диорита. Для проверки его применимости этот метод реализован в данном сообщении и для перидотита [1]. Для сравнения, определение упругих констант предлагается осуществлять еще следующим образом.

Показано [5], что в случае пропорционального нагружения согласно закону Гука для связи между приращениями напряжений и деформаций имеем:

$$\Delta \varepsilon_1 = \frac{\Delta \sigma_1}{E} [1 - 2c\nu] \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, c – параметр вида напряженного состояния ($c = \sigma_2 / \sigma_1$).

В рассматриваемом случае формулу (1) правомерно использовать, так как, согласно основному постулату теории упругости, траектория рассматриваемого сложного нагружения в конечной ее точке заменяется пропорциональным нагружением в эту точку.

На втором звене траектории нагружения выделим какое-либо одно и то же приращение напряжения $\Delta \sigma_1$, достигаемое при разных боковых давлениях.

Рассматривая зависимость $\Delta \varepsilon_1(\Delta \sigma_1)$ при различных комбинациях двух значений бокового давления можно, как и по предыдущему методу [5], используя (1), вычислим константы E и ν . Получено для перидотита $E = 56490$ МПа, $\nu = 0.21$.

Проверим, на сколько лучше отражается общая картина деформирования при том или ином методе определения упругих констант. Для этого построим зависимость приращения объемной деформации $\Delta \varepsilon$

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{3}(\Delta \varepsilon_1 + \Delta \varepsilon_2 + \Delta \varepsilon_3) \quad (\Delta \varepsilon_2 = \Delta \varepsilon_3) \quad (2)$$

от приращения среднего давления ($\Delta \sigma$)

$$\Delta \sigma = \frac{1}{3} \Delta \sigma_1 (1 + 2c), \quad (c = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \sigma_2 = \sigma_3) \quad (3)$$

Приращение поперечной деформации представляется подобно формуле (2), т.е.

$$\Delta \varepsilon_2 = \frac{\Delta \sigma_1}{E} [c - \nu(1 + c)] \quad (4)$$

Согласно (1)–(4), имеем

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{3} \frac{\Delta \sigma_1}{E} (1 - 2\nu)(1 + 2c) \quad (5)$$

Поскольку в эксперименте поперечная деформация не измерялась, то при сравнении теоретических и экспериментальных данных значения $\Delta \varepsilon_2 = \Delta \varepsilon_3$ во всех случаях вычислялись по формуле (5). Сопоставление теоретической и соответствующей «полуэмпирической» зависимости $\Delta \varepsilon(\Delta \sigma)$ представлено на рис. 2 (а,б). Как видно из этих рисунков, второй метод определения упругих констант предпочтительнее, поскольку в этом случае «полуэмпирическая» зависимость $\Delta \varepsilon(\Delta \sigma)$ несколько лучше соответствует теоретической линейной связи между объемной деформацией и средним давлением.

Окончательный выбор того или иного метода определения упругих констант зависит от наличия экспериментальных данных при разных траекториях сложного нагружения.

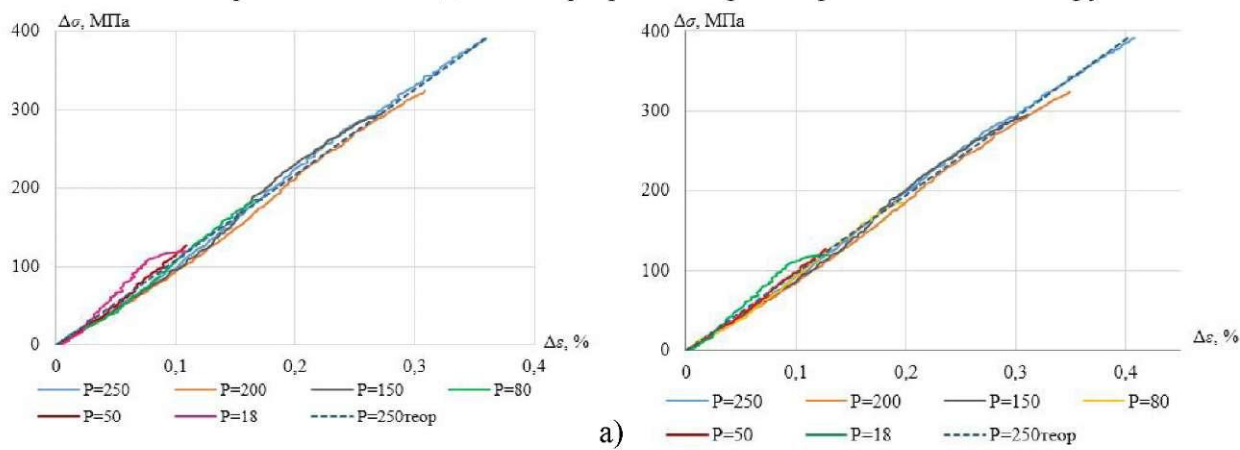


Рисунок 2 – Зависимость приращения объемной деформации $\Delta \varepsilon$ от приращения среднего давления $\Delta \sigma$ для периодотита: а) упругие константы определены по первому способу, представленному в [5], б) упругие константы определены по второму способу

О трактовке упругого модуля. В первоисточнике [1] используемых исходных экспериментальных данных, а также в некоторых других исследованиях [2-4] введен только один параметр, характеризующий приращение упругой деформации, а именно, утверждается, что

$$\Delta \varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_1^*}{E_f}, \quad (6)$$

где σ_1^* – осевое напряжение, достигнутое при гидростатическом давлении, а величина E_f считается модулем упругости.

Ранее [5] было показано, что модуль E_f является некоторой эмпирической функцией от вида и уровня напряженного состояния. Из сравнения (1) и (6) имеем:

$$E_f = \frac{E}{1 - 2\nu} \quad (7)$$

Сравнение значений E_f вычисляемых по формуле (7), с экспериментальными данными при фиксированных приращениях осевой деформации представлено на рис. 3

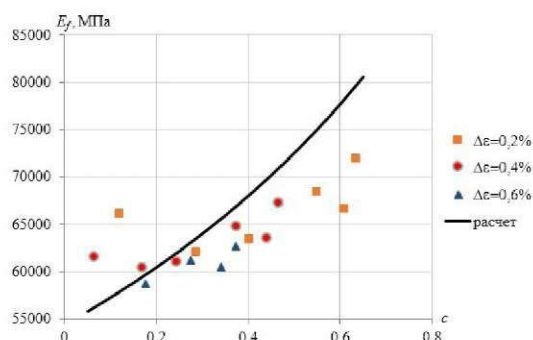


Рисунок 3 – Расчетные (сплошная линия) и экспериментальные (точки) значения фиктивного модуля упругости для перидотита

Итоговое сопоставление расчетных и представленных в [1] экспериментальных диаграмм в пределах упругости. Приращения осевой упругой деформации на втором звене рассматриваемой траектории сложного нагружения при разных боковых давлениях вычисляются по формуле (1). Результат сравнения расчетных диаграмм $\Delta\epsilon_1(\Delta\sigma_1)$ с экспериментальными данными представлен на рис.4; при этом использованы значения упругих констант, найденные по первому и второму способу их определения.

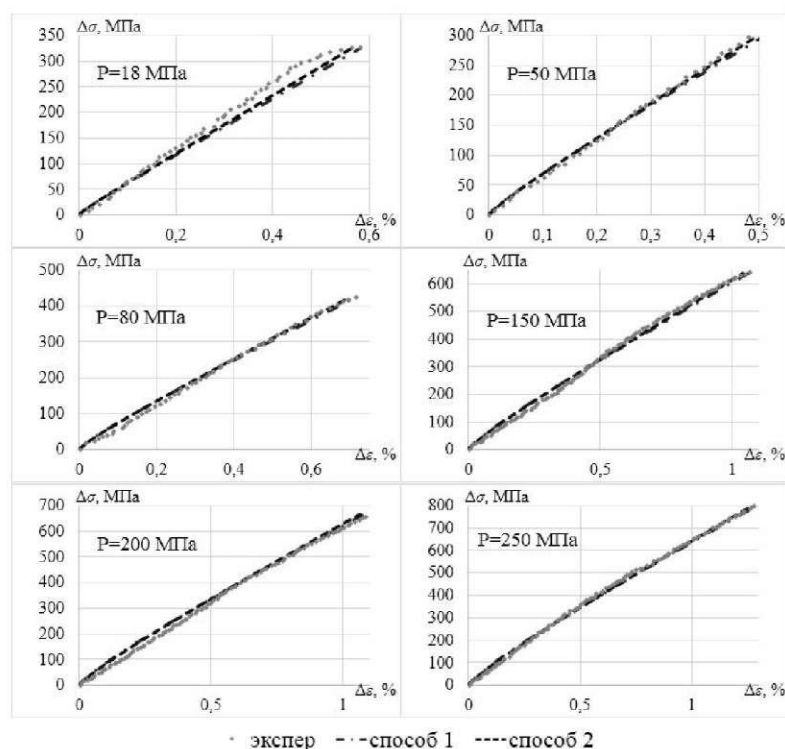


Рисунок 4 – Зависимости $\Delta\epsilon_1(\Delta\sigma_1)$ при различных боковых давлениях

Заключение. Таким образом, как при пропорциональном нагружении [6], так и при сложном нагружении упругая деформация горных пород (начально изотропных в исходном состоянии) характеризуется модулем Юнга и коэффициентом Пуассона как действительными константами материала. Как показало настоящее исследование, эмпирическая величина функции $E_f(c)$ (тракуемая как переменный упругий модуль [1])

согласуется с полученными в данном исследовании расчетными ее значениями в пределах естественного разброса экспериментальных данных.

В этой связи, предлагаемое уточнение методики определения упругих констант при сложном нагружении необходимо как для практических расчетов в пределах упругости, так и для последующего правильного отображения [7] деформационного упрочнения горных пород.

Литература

1. Mogi K. Experimental rock mechanics. The Netherlands, Taylor & Francis. Balkema, 2007. 380 с.
2. Al-Shayea N.A. Effects of testing methods and conditions on the elastic properties of limestone rock // Engineering Geology. 2004. Vol. 74. Pp. 139–156.
3. Hao Xu, Wen Zhou, Runcheng Xie, et al. Characterization of Rock Mechanical Properties Using Lab Tests and Numerical Interpretation Model of Well Logs. Mathematical Problems in Engineering, vol. 2016, Article ID 5967159, 13 pages, 2016. doi:10.1155/2016/5967159
4. Стефанов Ю.П. Нелинейные эффекты поведения горных пород // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 6. С. 54-61.
5. Рычков Б.А., Комарцов Н.М., Кулагина М.А., Резин П.М. Определение упругих констант диорита по экспериментальным данным трехосного сжатия цилиндрических образцов // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Материалы докл. VIII Междунар. конф. молодых ученых и студентов (г. Бишкек, 24-25 марта 2016 г.). Бишкек: НС РАН. 2016. С. 213-216.
6. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Пластичность горных пород. М.: Недра, 1979. 305 с.
7. Рычков Б.А. О деформационном упрочнении горных пород // Известия РАН. Механика твердого тела. 1999. № 2. С. 115-124.