



Материалы
**X Всероссийской
конференции
по механике
деформируемого
твёрдого тела**

Том 2

Самара 2017

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство научных организаций
Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике
Научный совет РАН по механике деформируемого твердого тела
Институт проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН
Самарский государственный технический университет

Материалы
X Всероссийской конференции
по механике деформируемого твердого тела
(18–22 сентября 2017 г., Самара, Россия)
Том 2

Под редакцией Н. Ф. Морозова,
А. В. Манжирова, В. П. Радченко

С а м а р а
Самарский государственный технический университет
2017

Содержание

<i>Канду В. В., Шитикова М. В., Росситин Ю. А.</i> Численный анализ вынужденных колебаний нелинейных пластинок в вязкоупругой среде при наличии внутреннего резонанса 1:1:2	10
<i>Катугина В. О.</i> Ползучесть ортотропных материалов	13
<i>Келлер И. Э., Петухов Д. С.</i> Асимптотическое распределение напряжений вблизи вершины углового выреза в нелинейно упрочняющемся теле	16
<i>Кирпичев В. А., Костичев В. Э., Михалкина С. А., Нагиев А. В.</i> Применение динамического моделирования для определения остаточных напряжений после алмазного выглаживания	19
<i>Кирпичев В. А., Сазанов В. П., Сургутанов Н. А., Шадрин В. К.</i> О связи коэффициента интенсивности напряжений и критической глубины нераспространяющейся трещины усталости	23
<i>Клебанов Я. М., Симаков А. И., Поляков К. А.</i> Применение метода модального разложения для управления квазистатическими деформациями	27
<i>Клюшников В. А., Гончар А. В., Мишакин В. В.</i> Исследование ультразвуковым методом процесса пластического деформирования сварного соединения из аустенитной стали	31
<i>Ковалев А. В., Русина Е. Ю., Яковлев А. Ю.</i> Об исследовании напряженно деформированного состояния в тонкой пластине с упругим включением в виде шайбы	35
<i>Колесникова А. С., Мазепа М. М., Кириллова И. В., Коссович Л. Ю.</i> Моделирование деформации колонного графена: размерный эффект	39
<i>Комарцов Н. М., Кулагина М. А., Рычков Б. А.,</i> О трактовке модуля упругости горных пород	42
<i>Коровайцева Е. А.</i> Исследование влияния вязкоупругих характеристик на напряженно-деформированное состояние полуплоскости	46
<i>Косыгин А. Н., Косыгина Л. Н.</i> Теоретико-экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния у вершины трещины. Асимптотическое разложение М. Уильямса. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений (метод фотоупругости)	49
<i>Кубышкина С. Н.</i> Расчет напряженно-деформированного состояния резьбового соединения в условиях неупругого реологического деформирования	53
<i>Ларичкин А. Ю., Банщикова И. А.</i> Учет свойств разнсопротивляемости растяжению и сжатию в условиях ползучести при кручении круглых стержней	57

<i>Свиистков А. Л.</i> Особенности исследования эластомерных нанокомпози- зитов на атомно-силовом микроскопе в режиме напoиндентирования	187
<i>Сеницкий Ю. Э., Элекина Е. Н.</i> Метод декомпозиции в динамиче- ских задачах теории упругости при наличии сил вязкого сопротив- ления	191
<i>Сергеев Р. Н., Осипов М. Н.</i> К вопросу о возможности определения температурного коэффициента линейного расширения с помощью цифровой спекл-интерферометрии	194
<i>Словиков С. В.</i> Механические свойства сетчатых имплантатов, ис- пользуемых при пластике грыжевых дефектов передней брюшной стенки	198
<i>Соколкин Ю. В., Зайцев А. В., Зубко И. Ю., Исаев О. Ю., Смир- нов Д. В., Судаков И. А.</i> Механическое поведение колец из тер- морасширенного графита при их эксплуатации в кранах с уплотне- нием по штоку	202
<i>Соколкин Ю. В., Зайцев А. В., Карев В. И., Коваленко Ю. Ф., Палкин Д. Д., Устинов К. Б.</i> Неупругое деформирование, объ- емное разрыхление, разупрочнение и локализованное разрушение песчаников при трехосном квазистатическом нагружении	207
<i>Соколкин Ю. В., Зайцев А. В., Фукалов А. А.</i> Эффективные мо- дули объемного сжатия двухфазных композитов со сплошными или полыми трансверсально-изотропными волокнами и сферическими включениями	212
<i>Соколова М. Ю., Христич Д. В.</i> Нелинейные упругие свойства кри- сталлов и квазикристаллов	215
<i>Соляев Ю. О., Лурье С. А.</i> Сопоставление аналитических и числен- ных методов определения эффективных характеристик пьезоупру- гих композитов в рамках анти-плоской задачи в градиентной теории пьезоупругости	218
<i>Степанова Л. В.</i> Влияние высших приближений в асимптотическом разложении М. Уильямса на описание поля напряжений в окрест- ности вершины трещины в изотропном линейно упругом материале	222
<i>Степанова Л. В., Миронова Е. А.</i> Смешанное нагружение тел с разрезами в условиях ползучести: асимптотический анализ поля напряжений у вершины трещины	226
<i>Степанова Ю. Ю., Рычков Б. А.</i> Определение упругих констант горных пород	230
<i>Столяр А. М.</i> Расчёт колебаний тонкостенных конструкций при ди- намическом нагружении	233
<i>Стружанов В. В.</i> О разрушении тонкостенного резервуара из разу- прочняющегося материала под действием давления	236

УДК 539.215

Определение упругих констант горных пород

Ю. Ю. Степанова, Б. А. Рычков

Кыргызско-Российский Славянский Университет имени Б. Н. Ельцина,
Кыргызская Республика, 720048, Бишкек, Чуй проспект, 6.

Аннотация

Рассмотрены экспериментальные данные А. И. Ставрогина по трехосному сжатию образцов песчаника при пропорциональном нагружении по схеме Т. Кармана. Предлагается уточнение способа определения упругих констант с учетом начального уплотнения материала.

Ключевые слова: гидростатическое давление, упрочнение и уплотнение материала, обобщенный закон Гука, учет нелинейности диаграммы деформации.

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 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]. В настоящем сообщении сделана попытка разработать процедуру определения упругих параметров песчаника, устраняющую указанное выше противоречие в этом вопросе.

1. Анализ криволинейных участков продольной деформации. Вид напряженного состояния характеризуется параметром $C = \sigma_2/\sigma_1$. Начиная с определенного уровня осевого напряжения (σ_1) (характерного для каждого C) можно выделить линейный участок диаграммы деформации $\varepsilon_1(\sigma_1)$. Аппроксимация с помощью линии тренда (линейной зависимостью) этого квазилинейного установившегося участка деформации и продолжение этой линии тренда до нулевого напряжения доставляет новое начало координаты для отсчета упругой деформации вплоть до предела упругости. Причем это начало координат оказывается одним и тем же для всех рассматриваемых видов напряженного состояния конкретной горной породы (расхождение при

Образец для цитирования

Степанова Ю. Ю., Рычков Б. А. Определение упругих констант горных пород / *Материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела* (18–22 сентября 2017 г., Самара, Россия). Т. 2. Самара: СамГТУ, 2017. С. 230–232.

Сведения об авторах

Юлия Юрьевна Степанова ✉ магистрант; e-mail: stepanova_yulya_1995@mail.ru

Борис Александрович Рычков  <http://orcid.org/0000-0001-7408-1657>

доктор физико-математических наук, профессор; e-mail: rychkovba@mail.ru

разных C составляет не более $\pm 5\%$). Таким образом, устраняется из рассмотрения начальная нелинейная деформация, наблюдаемая при нагружении цилиндрических образцов песчаников из исходного состояния. Эта начальная деформация не является чисто упругой деформацией [2], а содержит также деформацию уплотнения (как правило, пористость таких песчаников составляет 6–7 % [1]).

2. Пример обработки диаграммы продольной деформации. Применение охарактеризованной выше процедуры определения нового начала координат для выбороопасного песчаника [1] продемонстрировано на рис. 1 для $C = 0.069$.

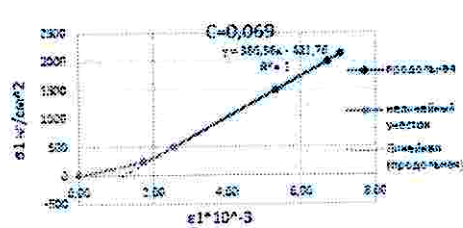


Рис. 1. Диаграмма продольной деформации песчаника при напряженном состоянии до предела упругости для $C = 0.069$

Для других видов напряженного состояния проделана аналогичная схема; в результате среднее значение деформации ϵ_1^0 , которое доставляет новое начало координат по оси абсцисс, получилось равным $\epsilon_1^0 = 1.357 \cdot 10^{-3}$. Если на диаграмме для поперечной деформации выделить участок, на котором с ростом уровня напряжения каждое последующее значение деформации по модулю больше предыдущего, то аппроксимация этого участка с привязкой к установленному новому началу координат также происходит с достаточной достоверностью. По перестроенным таким образом диаграммам деформации определены упругие константы: $E = 343571$ МПа, $\mu = 0.25$. Окончательное сопоставление расчетных и экспериментальных данных для рассмотренного выбороопасного песчаника представлено на рис. 2.

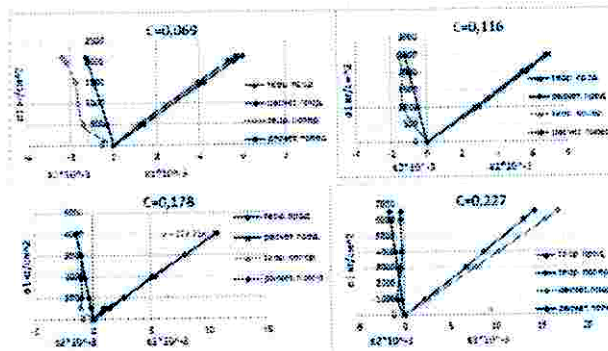


Рис. 2. Сопоставление расчётных и экспериментальных данных в упругой области деформирования цилиндрических образцов выбороопасного песчаника при различных видах напряженного состояния

Определение упругих констант по предлагаемому способу аппроксимации упругих участков диаграмм деформации устраняет также следующий парадокс. В [1, прил. № 2] даны значения остаточной продольной деформации ε_1^n после достижения предела прочности и коэффициент остаточной поперечной деформации μ . Если построить по этим значениям линию разгрузки поперечной деформации (например, для $C = 0.178$, $\mu = 1.76$, $\varepsilon_1 = 2.2 \cdot 10^{-3}$), то получим, что при полной разгрузке значение поперечной деформации по модулю увеличивается по сравнению с её значением, достигнутом на пределе прочности [1, прил. № 1]. Такого парадокса не будет, если поперечную деформацию отсчитывать от нового начала координат, соответствующего установившемуся упругому характеру деформирования.

Закключение. Представленный метод определения упругих констант материала, применительно к песчанику, достаточно хорошо соответствует экспериментальным данным в пределах их разброса и устраняет существующую неопределенность при выделении упругого начального участка диаграммы деформации.

Библиографический список

1. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. *Пластичность горных пород*. М.: Недра, 1979. 301 с.
2. Карташев Ю. М., Матвеев Б. В., Михеев Г. В., Фадеев А. Б. *Прочность и деформируемость горных пород*. М.: Недра, 1979. 262 с.
3. Введение в механику скальных пород. Под редакцией 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.

Determination of the elastic constants of rocks

Yu. Yu. Stepanova, B. A. Rychkov

Kyrgyz Russian Slavic University,
6, Chui prospekt, Bishkek, Kyrgyz Republic.

Abstract

The experimental data of A. N. Stavrogin by triaxial compression of sandstone samples under proportional loading according to T. Karman's scheme are considered. A refinement of the method for determining the elastic constants is proposed, taking into account the initial compaction of the material.

Keywords: hydrostatic pressure, hardening and compaction of material, generalized Hooke's law, accounting for the nonlinearity of the deformation diagram.

Please cite this article in press as:

Stepanova Yu. Yu., Rychkov B. A. Determination of the elastic constants of rocks, In: *Proceedings of the Tenth Russian Conference on Solid Mechanics* (September, 18–22, 2017, Samara, Russian Federation), Vol. 2, Samara State Technical Univ., Samara, 2017, pp. 230–232 (In Russian).

Authors' Details:

Yulya Y. Stepanova ✉ Master student; e-mail: stepanova_yulya_1995@mail.ru

Boris A. Rychkov © <http://orcid.org/0000-0001-7408-1657>

Dr. Phys. & Math. Sci., Professor; e-mail: rychkovba@mail.ru