

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богданов М.В. История солеварения Соликамска. – Соликамск, 2014. – 272 с.: ил.
2. Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на Верхнекамском месторождении солей. Ч. 1. Основные положения: утв. ПАО «Уралкалий». – Пермь, Березники, 2022 г. – 117 с.
3. Барях А.А., Самоделкина Н.А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – № 6. – С. 32-41.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
5. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
6. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.
7. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат. – 1947. – 180 с.

УДК 622.02

DOI:10.7242/echo.2024.2.4

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ИЗВЕСТНЯКА В УСЛОВИЯХ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ ПО СХЕМЕ БЕКЕРА

И.Л. Паньков, В.С. Евсеев
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: С целью ответа на вопрос о возможности применения критерия прочности, разработанного для оценки состояния горных пород, находящихся в условиях трехосного напряженного состояния, проведены исследования по изучению прочности образцов известняка в условиях трехосного сжатия по схеме Бекера ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$). Исследования проводились на кубических образцах со стороной 37 мм в специальной испытательной установке, помещаемой между плитами электромеханического пресса Zwick/Z250. Получены кривые деформирования образцов и построена зависимость изменения прочности известняка при нагружении по схеме Бекера от величины минимального главного напряжения. По результатам экспериментальных исследований сделан вывод об удовлетворительной применимости предложенного критерия прочности.

Ключевые слова: прочность горных пород, трехосное сжатие, схема Бекера, кривые деформирования, критерий прочности.

При разработки месторождений полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях особое внимание уделяется вопросам геомеханического обеспечения безопасного ведения горных работ. В настоящее время, в связи с развитием вычислительных возможностей компьютерной техники, решение ряда геомеханических задач базируется на численном расчете напряженно-деформированного состояния пород подработанных массивов в трехмерной постановке. В этой связи, возникает необходимость в разработке новых критериальных зависимостей перехода пород в предельное состояние, учитывающих величину максимального (σ_1), промежуточного (σ_2) и минимального (σ_3) главных напряжений. Пример подобного трехмерного критерия приведен в работах [1, 2]. Для обоснования возможности применения трехмерных критериев необходимо проведение сопоставительных испытаний горных пород в сложных объемных напряженных состояниях при различных схемах нагружения. Наиболее часто в экспериментальной геомеханике, приме-

няется схема Кармана, реализуемая при нагружении образцов в камерах объемного сжатия с соотношением главных напряжений $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ [3]. Также существует схема нагружения, впервые примененная Бекером, имеющая соотношение главных напряжений $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ [4]. Техническая реализация схемы Бекера при испытании горных пород много сложнее схемы Кармана, вследствие чего применяется крайне редко. Необходимо отметить, что одновременное применение этих двух схем позволяет оценить влияние промежуточного главного напряжения на прочность горных пород.

Исследования по схеме Бекера проводились в установке трехосного сжатия, помещаемой между нажимными плитами электромеханического пресса Zwick/Z250, что позволяло обеспечивать условие равенства максимального и промежуточного главных напряжений во время эксперимента (рис. 1, а). Конструкция установки предусматривает независимое задание минимального главного напряжения, которое в процессе проведения эксперимента оставалось постоянным и составляло: 0 МПа; 1,3 МПа; 2,6 МПа; 3,9 МПа; 5,2 МПа; 6,5 МПа и 7,8 МПа. Испытания проводились на кубических образцах со стороной 37 мм, изготовленных из бежево-серого известняка, имеющего неяснослоистую текстуру, сложенную чередующимися плотной тонкозернистой (менее 0,01 мм) и мелкозернистой (около 0,2 мм) разностями мощностью 1-2 см (рис. 1, б).

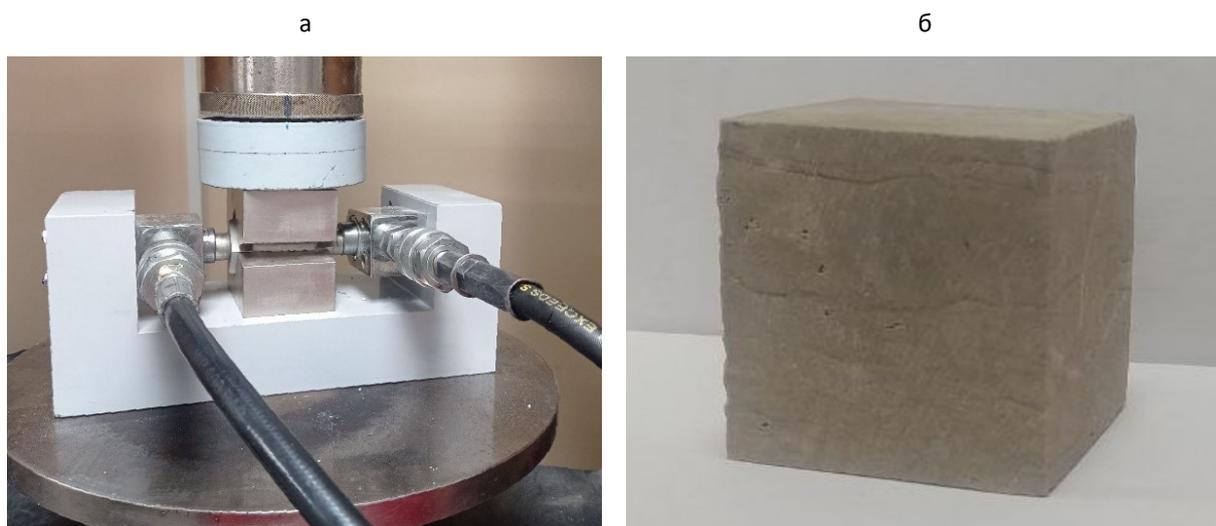


Рис. 1. Проведение испытание образцов известняка по схеме Бекера:
а – установка трехосного сжатия; б – испытываемый образец

По результатам экспериментов строились кривые деформирования в координатах «максимальное (промежуточное) главное напряжение ÷ максимальная (промежуточная) линейная деформация» (рис. 2). Прочность образцов известняка ($\sigma_1^{pp} = \sigma_2^{pp}$), испытанных по схеме Бекера, при соответствующем минимальном главном напряжении, приведена в табл. 1.

Одновременно с испытаниями образцов по схеме Бекера проводилось определение прочностных показателей образцов известняка при следующих схемах нагружения: одноосное растяжение ($\sigma_p = -2,5$ МПа) [5], одноосное сжатие ($\sigma_{сж1} = 19,7$ МПа) [6], а также трехосное сжатие по схеме Кармана ($\sigma_{сж3} = 65,0$ МПа) при постоянном боковом давлении ($\sigma_6 = 7,0$ МПа) [7]. Также в рамках проведенного комплекса экспериментальных исследований установлена прочность двухосного равнокомпонентного сжатия ($\sigma_{сж2} = 23,2$ МПа) известняка (табл. 1).

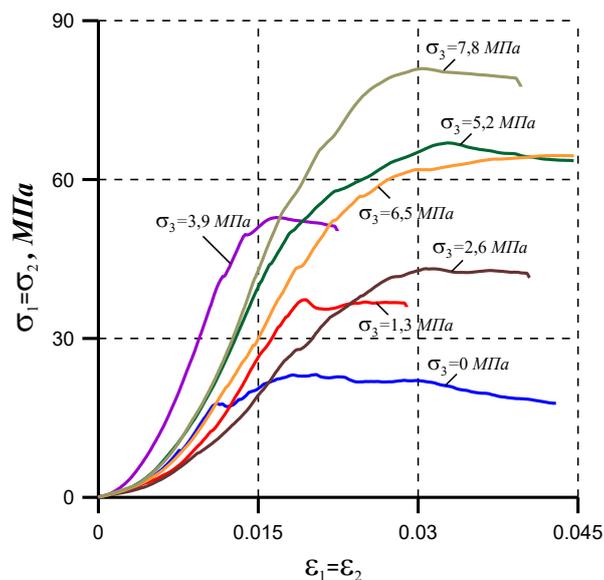


Рис. 2. Кривые деформирования известняка при сжатии по схеме Бекера

Таблица 1

Результаты определения прочности известняка, испытанного по схеме Бекера при различных значениях минимального главного напряжения

$\sigma_3, \text{МПа}$	0,0	1,3	2,6	3,9	5,2	6,5	7,8
$\sigma_1^{\text{пр}} = \sigma_2^{\text{пр}}, \text{МПа}$	23,2	37,3	43,1	52,9	66,9	64,7	80,9

Результаты экспериментального определения прочностных показателей известняка, испытанного по схеме Бекера, использовались для ответа на вопрос о возможности применения критерия прочности [1, 2], разработанного для оценки состояния горных пород, находящихся в условиях трехосного напряженного состояния:

$$\frac{A\sigma_1^2}{\sigma_1 + B} - C\sigma_2 - \sigma_3 - D = 0, \quad (1)$$

где A, B, C, D – параметры критерия прочности, вычисляемые по результатам комплексного определения прочности горных пород.

В табл. 2 приведены значения прочностных показателей, полученных при различных схемах нагружения образцов известняка и определенные по ним параметры критерия прочности (1).

На рис. 3 приведены результаты экспериментального определения прочностных показателей известняка, испытанного по схеме Бекера при постоянных значениях минимального главного напряжения, а также график соответствующей теоретической зависимости, описываемой уравнением (1).

Таблица 2

Прочностные показатели и параметры критерия прочности известняка

$\sigma_p, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{сж1}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{сж2}}, \text{МПа}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{сж3}}, \text{МПа}$	A	$B, \text{МПа}$	C	$D, \text{МПа}$
-2,5	19,7	23,2	7,0	65,0	0,16	5,24	0,02	2,5

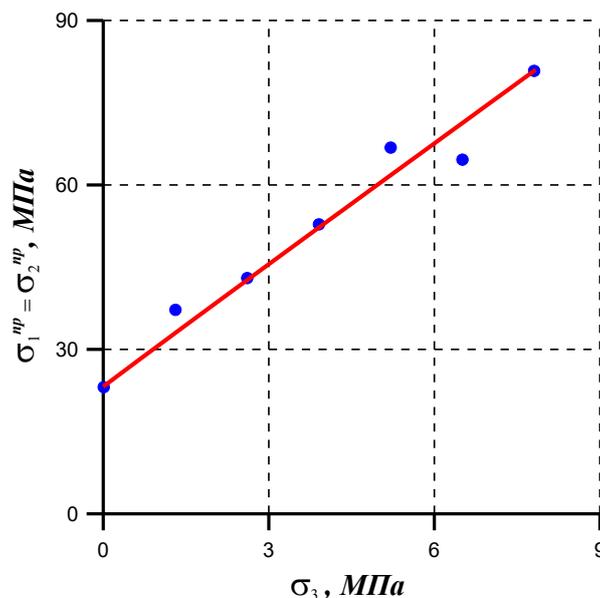


Рис. 3. Результаты экспериментального и теоретического определения влияния минимального главного напряжения на прочность известняка при сжатии по схеме Бекера (точки – экспериментальные данные; линия – теоретическая зависимость)

Анализ сопоставления экспериментальных и теоретических определений прочности известняка выявил достаточно четкую сходимость полученных результатов (рис. 3), что подтверждает удовлетворительную применимость критерия (1) при оценке разрушения горных пород, находящихся в условиях объемного напряженного состояния. Дальнейшие исследования необходимо вести в направлении изучения возможности применения предложенного критерия в отношении других горных пород скального и полускального типа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500031-4)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Паньков И.Л. О результатах разработки критерия прочности для условий истинного трехосного напряженного состояния горных пород // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 46-50. – DOI: 10.7242/echo.2020.1.10.
2. Pankov I. The strength criterion for rocks under true triaxial stress // Procedia Structural Integrity. – 2021. – V. 32. – P. 166-172. – DOI: 10.1016/j.prostr.2021.09.024.
3. Von Karman T. Festigkeitsversuche unter allseitigem // Ver Dentsch In. – 1911. – V. 55. – S. 1749-1757.
4. Boker R. Die Mechanik der bleibender Formänderung auf Kristallinisch aufgebauten Körper: Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. – Berlin, 1915. – S. 175-176.
5. ГОСТ 21153.3-85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. – Введ. 01.01.87. – М., 1986. – 14 с.
6. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – Введ. 1986-01-07. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 10 с.
7. ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Методы определения предела прочности при объемном сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 17 с.