

# МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.02

DOI:10.7242/echo.2022.2.7

## МЕТОДИКА УЧЕТА РАЗМЕРОВ ЦЕЛИКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ИХ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

И.Л. Паньков

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Разработана методика учета размеров целиков различного назначения при оценке их несущей способности. В рамках разработанной методики предложен новый «трехмерный» коэффициент формы экспоненциального вида, учитывающий высоту, ширину и длину целика. По результатам проведенных экспериментальных исследований получены показатели предлагаемого коэффициента формы для сильвинитовых пород.

**Ключевые слова:** коэффициент формы, высота, ширина и длина целика (образца), одноосное и двухосное равнокомпонентное сжатие.

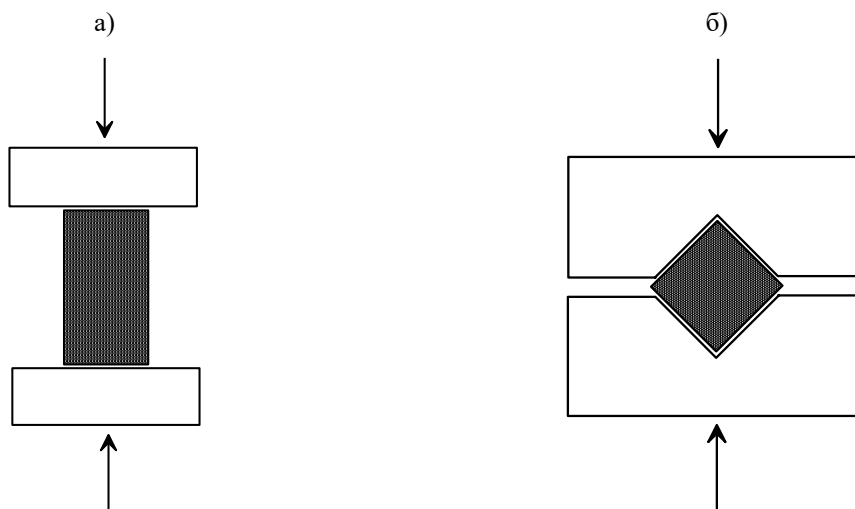
Широкое применение поддерживающих целиков при разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом требует создания новых методик оценки их несущей способности, которые наряду с высотой ( $h$ ) и шириной ( $b$ ) должны учитывать и длину ( $l$ ) целика. Ввиду отсутствия возможности проведения полноценных экспериментальных исследований по влиянию размеров целика на его несущую способность, традиционно испытания подобного вида проводится на цилиндрических или квадратных призматических образцах горных пород при сжатии в лабораторных условиях. При этом определяется функция, называемая коэффициентом формы ( $K_f$ ), характеризующая изменение прочности образцов с произвольным отношением высоты к ширине ( $h/b$ ) по сравнению с кубической прочностью образца с отношением  $h/b=1$ , либо по сравнению с прочностью стандартного образца с отношением  $h/b=2$ . Полученные на образцах зависимости коэффициента формы используются при геомеханической оценке несущей способности целиков различного назначения. Зависимости, наиболее часто используемые в геомеханических расчетах для определения коэффициента формы горных пород, приведены в работах [1, 2, 3]. Несмотря на большое количество работ, посвященных различным коэффициентам формы, исследования, учитывающие влияние длины ( $l$ ) образцов (целиков) на их несущую способность, до недавнего времени практически отсутствовали. С целью устранения данного пробела в ГИ УрО РАН были проведены экспериментальные исследования, направленные на выявление влияния длины образцов сильвинита на коэффициент формы [4]. По результатам анализа проведенных исследований в работе [5] предложено «трехмерный» коэффициент формы записывать в виде произведения экспоненциального «двухмерного» коэффициента формы и степенной функции:

$$K_f(h, b, l) = e^{m \cdot (\frac{b}{h} - 0,5)} \cdot \left( \frac{s + 1}{s + b/l} \right)^p, \quad (1)$$

где  $s$  – задаваемый эмпирический параметр, имеющий положительную величину;  $p$  – показатель степени, определяемый выражением:

$$p = \frac{\ln \frac{2\sigma_{сж2}}{\sigma_{сж2} + \sigma_{сж1}}}{\ln(1 + 1/s)}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{сж1}$  и  $\sigma_{сж2}$  – прочность породы при испытании на одноосное сжатие и двухосное равнокомпонентное сжатие [6] (схемы испытаний приведены на рис. 1).



**Рис. 1.** Схемы экспериментального определения прочностных показателей горных пород при одноосном (а) и двухосном равнокомпонентном (б) сжатии

Таким образом, подход, используемый в работе [5] при построении «трехмерного» коэффициента формы (1), предполагает запись:

$$K_f(h, b, l) = K_f(h/b) \cdot K_l(l/b), \quad (3)$$

где  $h/b$  и  $l/b$  – относительные высота и длина образца;  $K_f(h/b)$  – произвольный «двухмерный» коэффициент формы;  $K_l(l/b)$  – коэффициент длины, изменяющейся в интервале:

$$K_l(1) \leq K_l(l/b) < K_l(\infty), \quad (4)$$

где  $K_l(1)$  – коэффициент длины образцов с относительной длиной  $l/b = 1$ ;  $K_l(\infty)$  – коэффициент длины образцов с относительной длиной  $l/b = \infty$ .

Границы интервала изменения коэффициента длины (4) определяются прочностью на одноосное сжатие стандартного образца  $\sigma_{сж1}$  (размер –  $h = 2b, l = b$ ) и прочностью бесконечно длинного образца  $\sigma_1(\infty)$  такой же высоты (размер –  $h = 2b, l = \infty$ ). Следовательно:

$$K_l(1) = 1; K_l(\infty) = \frac{\sigma_1(\infty)}{\sigma_{сж1}}. \quad (5)$$

Для вычисления прочности бесконечно длинного образца  $\sigma_1(\infty)$  определим соотношение между максимальным главным напряжением  $\sigma_1$  (вертикальное напряжение) и промежуточным главным напряжением  $\sigma_2$  (горизонтальное напряжение вдоль длинной оси) в бесконечно длинном образце в момент достижения предела прочности. Соответственно, минимальное главное напряжение  $\sigma_3$  (горизонтальное напряжение, перпендикулярное длинной оси) и промежуточная главная деформация  $\varepsilon_2$  будут равны нулю. Обобщенный закон Гука для вышеприведенных условий запишется в следующем виде:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \mu\sigma_2) \\ \varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \mu\sigma_1) = 0, \\ \varepsilon_3 = \frac{1}{E}(-\mu\sigma_1 - \mu\sigma_2) \end{cases} \quad (6)$$

где  $E$  – модуль деформации;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Так как выражение (6) определяет соотношение между напряжениями и деформациями на пределе прочности породы, находящейся в состоянии разуплотнения, то согласно положениям, изложенным в работе [7], коэффициент Пуассона необходимо классифицировать как коэффициент поперечных деформаций, верхняя граница изменения которого может превышать 0,5.

Анализ результатов исследований на объемное сжатие, приведенных в работе [8], позволил установить, что объемную деформацию в момент достижения предела прочности с высокой степенью достоверности можно принять равной нулю (рис. 2):

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0. \quad (7)$$

Для определения значения коэффициента поперечных деформаций на пределе прочности путем подстановки (6) в (7) приходим к квадратному уравнению:

$$2\mu^2 + \mu - 1 = 0. \quad (8)$$

Из решения уравнения (8), следует, что  $\mu = 0,5$ . Это означает, что для бесконечно длинного целика в момент разрушения максимальное главное напряжение в два раза превышает промежуточное главное напряжение:

$$\sigma_1(\infty) = 2\sigma_2(\infty). \quad (9)$$

Зависимость (9) показана на рис. 3 в виде прямой 1. Напряжение  $\sigma_1(\infty)$  находится как точка пересечения прямой 1 и прямой 2, проходящей через точки, соответствующие пределам прочности на одноосное  $\sigma_{сж1}$  и двухосное равнокомпонентное  $\sigma_{сж2}$  сжатие (рис. 3). Получаем:

$$\sigma_1(\infty) = \frac{2\sigma_{сж1}\sigma_{сж2}}{\sigma_{сж1} + \sigma_{сж2}}. \quad (10)$$

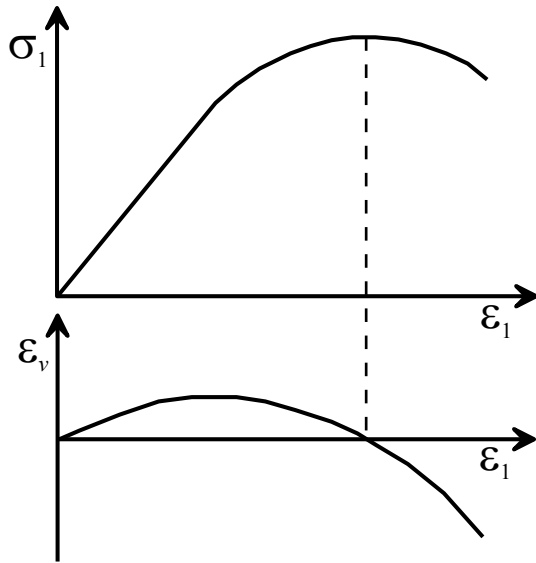
Соответственно, коэффициент длины бесконечно длинного образца составляет:

$$K_l(\infty) = \frac{\sigma_1(\infty)}{\sigma_{сж1}} = \frac{2\sigma_{сж2}}{\sigma_{сж1} + \sigma_{сж2}}. \quad (11)$$

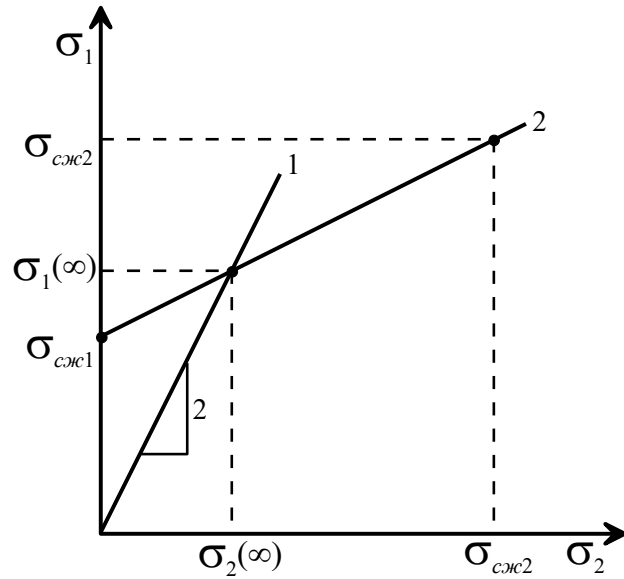
В работе [5] коэффициент длины предлагалось принимать в виде степенной функции. В данной работе коэффициент длины выберем в виде экспоненциальной функции:

$$K_l(l/b) = K_l(\infty) - (K_l(\infty) - 1) \cdot e^{n(\frac{l}{b}-1)}, \quad (12)$$

где  $n$  – показатель, вычисляемый по результатам экспериментального определения коэффициента длины.



**Рис. 2.** Качественная зависимость между максимальным главным напряжением при сжатии образца горной породы и объемной деформацией



**Рис. 3.** Схема оценки величины предела прочности бесконечно длинного образца с относительной высотой  $h/b = 2$

Для определения показателя  $n$  преобразуем (12) в уравнение:

$$K_l(\infty) - K_l(l/b) = (K_l(\infty) - 1) \cdot e^{n(\frac{l}{b}-1)}. \quad (13)$$

Прологарифмировав левую и правую часть уравнения (13), получаем:

$$\ln(K_l(\infty) - K_l(l/b)) = \ln(K_l(\infty) - 1) + n \cdot (l/b - 1). \quad (14)$$

Введя в (14) новые переменные

$$y = \ln(K_l(\infty) - K_l(l/b)); \quad x = l/b - 1, \quad (15)$$

приходим к уравнению прямой:

$$y = a + n \cdot x, \quad (16)$$

где  $a = \ln(K_l(\infty) - 1)$ .

Учитывая (1), (3) и (12), выражение для нового «трехмерного» коэффициента формы будет иметь следующий вид:

$$K_f(h, b, l) = e^{m \cdot (\frac{b}{h} - 0,5)} \cdot \left( K_l(\infty) - (K_l(\infty) - 1) \cdot e^{n(\frac{l}{b}-1)} \right). \quad (17)$$

В качестве примера воспользуемся результатами экспериментальных исследований по определению коэффициента формы «низких» ( $h/b = 1$ ) и «высоких» ( $h/b = 2$ ) образцов сильвинита различной длины, приведенными в работе [4] (табл. 1). Осредненные прочностные показатели сильвинита составляли:  $\sigma_{сж1} = 25$  МПа;  $\sigma_{сж2} = 60$  МПа.

Таблица 1

Результаты экспериментального определения коэффициента длины сильвинитовых образцов различного размера

Относительная высота, $h/b$	Коэффициент формы, $K_f$			
	$l/b = 1$	$l/b = 2$	$l/b = 4$	$l/b = 6$
1	1,32	1,65	1,81	1,95
2	1,00	1,16	1,23	1,33

Уравнение прямой (17), построенной по данным коэффициента формы «высоких» образцов сильвинита, приведено на рис. 4а. На рис. 4б показан график изменения коэффициента длины сильвинита.

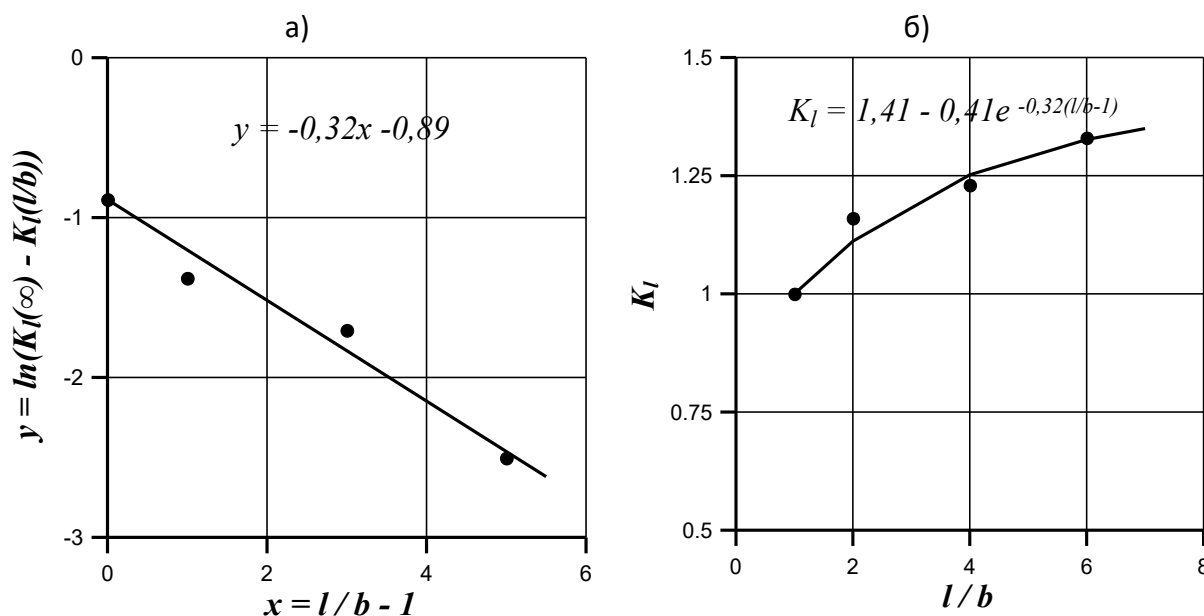


Рис. 4. Пример определения экспоненциального показателя (а) уравнения коэффициента длины (б) по результатам испытаний сильвинитовых образцов различного размера

Используемые при определении уравнения (17) коэффициента формы сильвинитовых образцов осредненные параметры сведены в табл. 2 и могут быть использованы при уточнении параметров системы разработки продуктивных пластов Верхнекамского месторождения калийных солей.

Таблица 2

Осредненные параметры коэффициента формы образцов сильвинита различного размера

$K_l(\infty)$	$n$	$m$
1,41	-0,32	0,55

Результаты проведенных исследований предназначены для оценки несущей способности поддерживающих целиков произвольного размера, оставляемых при разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000403-1), а также РФФИ и Пермского края по гранту № 19-45-590004.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ведмедев А.В. Коэффициент формы в расчётах подземных сооружений // Геотехническая механика: межведомств. сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2004. – Вып. 51. – С. 250-257.
2. Беньявски З. Управление горным давлением: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 254 с.: ил.
3. Прочность и деформируемость горных пород / [Ю.М. Карташов и др.]. – М.: Недра, 1979. – 269 с.: ил.
4. Паньков И.Л., Ударцев А.А. Экспериментальные исследования влияния длины прямоугольных образцов сильвинита на коэффициент формы // Горное эхо. – 2020. – № 3 (80). – С. 44-48. – DOI: 10.7242/echo.2020.3.8.
5. Паньков И.Л. О новом коэффициенте формы, учитывающем размеры прямоугольных образцов горных пород // Горное эхо. – 2021. – № 1 (82). – С. 60-63. – DOI: 10.7242/echo.2021.1.10.
6. 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.
7. Баклашов И.В. Геомеханика: учебник для вузов. Т. 1. Основы геомеханики. – М.: МГГУ, 2004. – 208 с.
8. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М.: Недра, 1985. – 271 с.: ил.

УДК 535.92

DOI:10.7242/echo.2022.2.8

## РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ. ТЕХНОЛОГИЯ DSS

А.И. Кузнецов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В статье описаны лабораторные эксперименты с DSS технологией и приведена краткая информация о работе данной технологии и вариантах ее применения. Данные исследования направлены на оценку возможности использования оптического волокна для долговременного мониторинга деформаций при решении различных задач геомеханики: мониторинг оседаний земной поверхности в процессе ведения горных работ, контроль деформаций крепи шахтных стволов, контроль деформаций массивов пород вокруг выработок и т.п.

**Ключевые слова:** шахта, рудник, инженерные системы, распределенные волоконно-оптические измерения, DSS, распределенное измерение деформации (Distributed Strain Sensing), геомеханика, геофизика, безопасность рудников.

Системы распределенного волоконно-оптического мониторинга температуры (DTS – Distributed Temperature Sensing), акустики (DAS – Distributed Acoustic Sensing), деформаций (DSS – Distributed Strain Sensing) являются относительно новыми технологиями для горнорудной промышленности. Исторически перечисленные технологии впервые были разработаны и применены для решения проблем нефтегазовой отрасли, для мони-