

Согласно выполненным ранее исследованиям [1, 2], экспериментально установлено, что в условиях ползучести увеличение степени нагружения соляных образцов на 0.1 от среднего предела прочности на сжатие сопровождается увеличением скорости деформирования в 3 раза. Опираясь на эту зависимость, можно предположить, что ошибка в определении степени нагружения междукамерных целиков по результатам измерения скорости горизонтальной конвергенции при описанных выше условиях не превысит $0.01\sigma_{сж}$.

Необходимость учета места установки контрольных точек при производстве мониторинговых измерений должна определяться задачами исследования и требуемой точностью.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научного проекта № 20-45-596011 р_НОЦ_Пермский край
и Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения
по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Baryakh A.A., Evseev A.V., Udartsev A.A. Experimental justification of the fracture criteria of interchamber pillars // ISRM International simposium – EUROCK 2020: Trondheim, Virtual, Norway. – Trondheim, 2020. – Код 165200.
2. Baryakh A.A., Evseev A.V., Lomakin I.S., Tsayukov A.A. Operational control of rib pillar stability // Eurasian mining. – 2020. – № 2 – DOI: 10.17580/em.2020.02.02.

УДК 622.02

DOI:10.7242/echo.2022.3.4

УТОЧНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФОРМЫ СОЛЯНЫХ ПОРОД ГРЕМЯЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

И.А. Морозов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Коэффициент формы – один из важнейших показателей, который учитывает влияние размеров образцов горных пород на их механические характеристики и используется при определении параметров камерной системы разработки. В работе приведены результаты исследований по уточнению коэффициента формы сильвинита, каменной соли и карналлита шахтного поля Гремячинского рудника. Получены формулы для оценки предела прочности при одноосном сжатии, касательного и секущего модулей деформации и модуля спада соляных пород в зависимости от отношения высоты к ширине (диаметру) образцов, испытываемых на сжатие.

Ключевые слова: соляные породы, сильвинит, каменная соль, карналлит, коэффициент формы, механические характеристики.

Существенное влияние на характер деформирования и разрушения соляных пород при сжатии оказывают силы трения между торцами образцов и плитами пресса. Проскураков Н.М. в работе [1] указывает, что снижение трения между торцами образцов и плитами пресса, которое достигается за счет применения специальных прокладок, смазки, шлифовки торцов образцов и плит пресса, может приводить к значительному уменьшению полученного по данным эксперимента значения прочности – до 50% и более. Причем влияние трения увеличивается с уменьшением высоты образца [1-3]. В работе [4] установлено, что коэффи-

циент трения между торцами образцов и плитами прессы оказывает влияние не только на значения прочностных характеристик, но также на значения деформационных и энергетических параметров горных пород, определяемых по результатам сжатия образцов.

Исследованием влияния формы образцов на значения прочностных характеристик, определяемых по результатам одноосного сжатия в лабораторных условиях, занимались: Асанов В.А., Баушингер Г., Беньявски З.Т., Ерофеев Н.П., Карташов Ю.М., Машанов А.Ж., Нестеренко Г.Т., Паньков И.Л., Проскуряков Н.М., Серая А.Р., Усаченко Б.М., Церн М., Шашенко А.Н. и др. [1, 3, 5-7].

В настоящее время единого мнения относительно вида коэффициента формы не существует [6, 8]. Так, например, авторы [6] считают, что формулы для определения прочности горных пород в зависимости от соотношения высоты к диаметру испытываемых образцов для большинства горных пород должны иметь один и тот же вид, но в работе [8] приводится мнение о том, что указанные соотношения должны отражать индивидуальные особенности деформирования и разрушения горных пород и не могут быть универсальными.

Несмотря на отсутствие единого мнения относительно вида коэффициента формы, исследования влияния высоты образцов на их прочностные характеристики имеют важное практическое значение и применяются для определения параметров системы разработки, в том числе при оценке несущей способности целиков различного назначения в зависимости от отношения их высоты к ширине [5, 9-11].

В связи с этим цель работы – уточнение коэффициента формы соляных пород Гремячинского месторождения – является актуальной.

Для экспериментов на одноосное сжатие соляных пород Гремячинского месторождения были изготовлены образцы с отношением высоты к диаметру $h/d \in [0,3; 2,0]$.

Эксперименты выполнены на электромеханической испытательной машине Zwick/Z250, предельное усилие которой составляет 250 кН (рис. 1).



Рис. 1. Электромеханический пресс Zwick/Z250

По результатам испытания каждого образца строилась диаграмма деформирования в координатах «продольное напряжение – относительная продольная деформация» и определялись следующие механические показатели:

- предел прочности при одноосном сжатии – $\sigma_{пр}$, МПа;
- касательный модуль деформации – D_y , ГПа;
- секущий модуль деформации – $D_{пр}$, ГПа;
- касательный модуль спада – M_c , ГПа.

Значения D_y , $D_{пр}$, M_c определялись как тангенсы соответствующих углов, обозначенных на схеме (рис. 2).

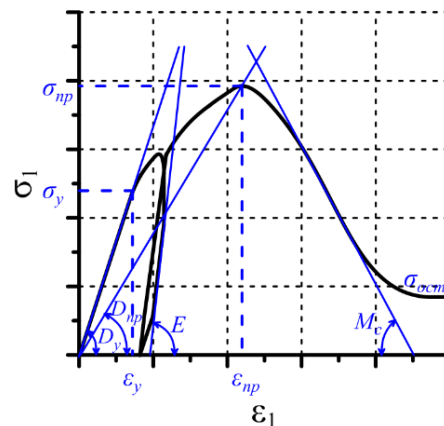


Рис. 2. Схема к определению механических характеристик по диаграмме «продольное напряжение – относительная продольная деформация»

Всего было испытано 124 образца пород Гремячинского месторождения, в том числе: сильвинит – 42, каменная соль – 36, карналлит – 46.

Результаты экспериментального исследования влияния формы (h/d) образцов соляных пород на их прочностные и деформационные характеристики при одноосном сжатии представлены на рис. 3. При этом наибольший разброс экспериментальных данных характерен для деформационных характеристик.

Анализ экспериментальных данных показал, что изменение отношения высоты к диаметру испытываемых на одноосное сжатие образцов соляных пород Гремячинского месторождения в диапазоне от 0,3 до 2,0 приводит к изменению величины предела прочности, касательного модуля деформации, секущего модуля деформации сильвинита и каменной соли в 2-2,7 раз. Те же показатели карналлитовой породы изменяются в 1,6-5,4 раз. Важно отметить, что из рассмотренных показателей сильнее всего изменяется касательный модуль спада в зависимости от отношения высоты к диаметру испытываемых образцов. Значение показателя может изменяться на порядок и более при изменении отношения высоты к диаметру образцов в том же диапазоне (рис. 3).

По результатам экспериментов на одноосное сжатие были получены зависимости предела прочности ($\sigma_{пр}$), касательного модуля деформации (D_y), секущего модуля деформации ($D_{пр}$), касательного модуля спада (M_c) от h/d образцов в виде:

$$X\left(\frac{h}{d}\right) = X_{\frac{h}{d}=2,0} \cdot K_{\phi}, \quad (1)$$

где X – значение механического показателя ($\sigma_{пр}$, D_y , $D_{пр}$ или M_c), соответствующее образцу с отношением высоты к ширине (диаметру) равном h/d ; $X_{\frac{h}{d}=2,0}$ – значение меха-

нического показателя ($\sigma_{пр}$, D_y , $D_{пр}$ или M_c), соответствующее образцу с отношением высоты к ширине (диаметру) равном 2,0.

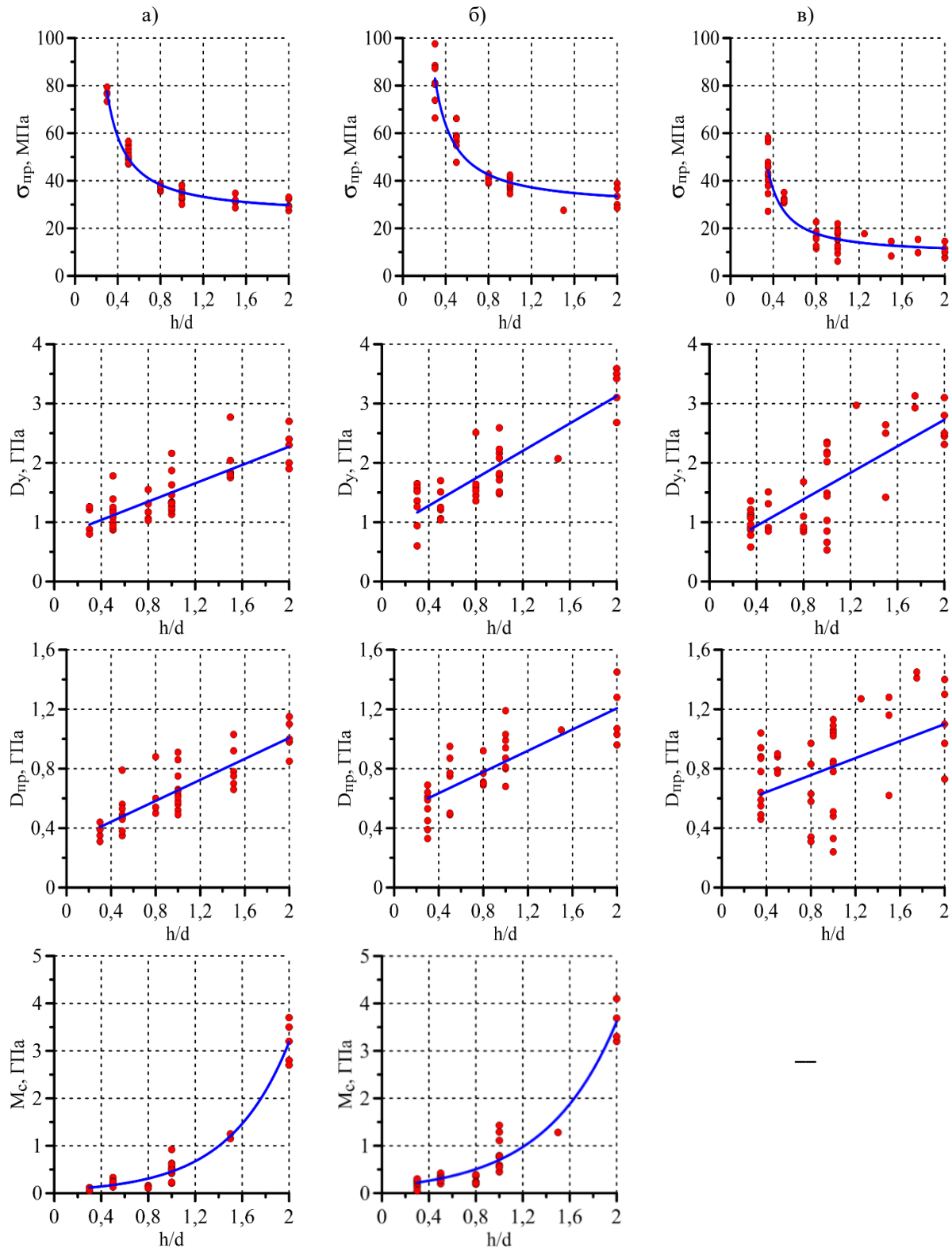


Рис. 3. Результаты исследования влияния формы (h/d) на прочностные и деформационные характеристики при одноосном сжатии образцов сильвинита (а), каменной соли (б) и карналлита (в) Гремячинского месторождения:

$\sigma_{пр}$ – предел прочности; D_y – касательный модуль деформации;
 $D_{пр}$ – секущий модуль деформации; M_c – касательный модуль спада

Коэффициент формы (K_ϕ) в выражении (1) для механических характеристик сильвинита, каменной соли и карналлита Гремячинского месторождения определяется в соответствии с результатами экспериментальных исследований по рис. 4.

Порода	Касательный модуль деформации	Секущий модуль деформации	Модуль спада	Предел прочности	
	$a_1 + a_2 \cdot \frac{h}{d}$	$a_1 + a_2 \cdot \frac{h}{d}$		$a_1 \cdot \text{Exp}(a_2 + a_3 \cdot \frac{h}{d})$	$a_1 + a_2 \cdot \frac{d}{h}$
Сильвинит	$a_1 = 0,32;$ $a_2 = 0,34;$ $R^2 = 0,66$	$a_1 = 0,30;$ $a_2 = 0,35;$ $R^2 = 0,70$	$a_1 = 0,05;$ $a_2 = -0,84;$ $a_3 = 1,94;$ $R^2 = 0,96$	$a_1 = 0,75;$ $a_2 = 0,50;$ $R^2 = 0,94$	$a_1 = 0,76;$ $a_2 = 0,10;$ $a_3 = 0,34;$ $R^2 = 0,97$
Каменная соль	$a_1 = 0,26;$ $a_2 = 0,37;$ $R^2 = 0,76$	$a_1 = 0,40;$ $a_2 = 0,30;$ $R^2 = 0,63$	$a_1 = 0,06;$ $a_2 = -0,49;$ $a_3 = 1,64;$ $R^2 = 0,94$	$a_1 = 0,78;$ $a_2 = 0,44;$ $R^2 = 0,89$	$a_1 = 0,79;$ $a_2 = 0,07;$ $a_3 = 0,32;$ $R^2 = 0,91$
Карналлит	$a_1 = 0,18;$ $a_2 = 0,41;$ $R^2 = 0,59$	$a_1 = 0,48;$ $a_2 = 0,26;$ $R^2 = 0,25$	–	$a_1 = 0,45;$ $a_2 = 1,10;$ $R^2 = 0,84$	$a_1 = 0,86;$ $a_2 = -0,14;$ $a_3 = 0,57;$ $R^2 = 0,85$

Рис. 4. Коэффициент формы для определения механических характеристик сильвинита, каменной соли и карналлита Гремячинского месторождения

Коэффициент формы (K_ϕ) для прочностных характеристик соляных пород определялся в виде:

– гиперболический:

$$K_\phi \left(\frac{h}{d} \right) = a_1 + a_2 \cdot \frac{d}{h} \quad (2)$$

– экспоненциальный:

$$K_\phi \left(\frac{h}{d} \right) = a_1 \cdot \text{Exp}(a_2 + a_3 \cdot \frac{d}{h}), \quad (3)$$

где a_1, a_2, a_3 – эмпирические коэффициенты.

На рис. 5 показаны зависимости $\sigma_{\text{пр}} \left(\frac{h}{d} \right)$ для сильвинита, каменной соли и карналлита, полученные с использованием представленных выше коэффициентов формы вида (2) и (3): черным показана зависимость, полученная с помощью гиперболического коэффициента формы с эмпирическими коэффициентами $a_1 = 0,650$ и $a_2 = 0,689$ и используемая на Гремячинском месторождении для определения параметров системы разработки [10]; зелёным показана зависимость, также полученная с использованием гиперболического коэффициента формы, но с эмпирическими коэффициентами a_1 и a_2 , значения которых соответствуют проведенным экспериментальным исследованиям (рис. 4); синим – зависимость, полученная с использованием экспоненциального коэффициента формы (рис. 4).

По графикам (рис. 5) видно, что лучше всего зависимость прочности соляных пород Гремячинского месторождения от отношения высоты к ширине (диаметру) испытываемых на одноосное сжатие образцов описывается коэффициентом формы экспоненциального вида с параметрами, представленными в рис. 4.

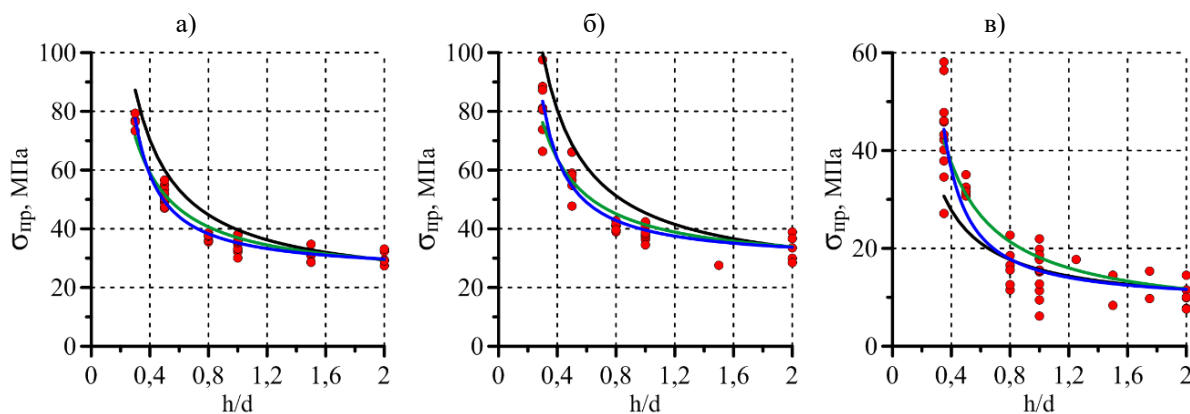


Рис. 5. Прочность сильвинита (а), каменной соли (б) и карналлита (в) Гремячинского месторождения в зависимости от отношения высоты к диаметру испытываемых на сжатие образцов:
 – коэффициент формы, который применяется на месторождении [10];
 – коэффициент формы гиперболического вида;
 – коэффициент формы экспоненциального вида

По результатам проведенных исследований выполнено уточнение коэффициента формы соляных пород Гремячинского месторождения, что необходимо для расчета параметров системы разработки.

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. Проскуряков Н.М., Пермяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород. – Л.: Недра, 1973. – 272 с.: ил.
2. Баклашов И.В. Геомеханика: учебник для вузов. Т. 1. Основы геомеханики. – М.: МГУ, 2004. – 208 с.
3. Паньков И.Л., Асанов В.А., Ударцев А.А., Кузьминых В.С. Практика использования испытательного оборудования при изучении деформирования и разрушения квазипластичных горных пород в лабораторных условиях // Вестн. Кыргызско-Рос. славянского ун-та (Бишкек) Вестн. КРСУ. – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 163-167.
4. Паньков И.Л., Морозов И.А. Исследование влияние коэффициента трения между торцами образцов различной высоты и плитами пресса на механические показатели соляных пород // Изв. вузов. Горн. журн. – 2015. – № 2. – С. 107-113.
5. Ведмедев А.В. Коэффициент формы в расчётах подземных сооружений // Геотехническая механика: межведомств. сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2004. – Вып. 51. – С. 250-257.
6. Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. – М.: Недра, 1979. – 269 с.: ил.
7. Паньков И.Л., Морозов И.А. Результаты экспериментального исследования влияния трения на механические показатели соляных пород // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 64-72.
8. Бурштейн Л.С. Статические и динамические испытания горных пород. – Л.: Недра, 1970 – 182 с.: ил.
9. Асанов В.А. Геомеханическая оценка устойчивости несущих элементов камерной системы разработки соляных пород: дис. ... д.т.н.: 25.00.20: защищена 24.12.04 / Асанов Владимир Андреевич. – Пермь, 2004. – 362 с.
10. Иофис М.А., Есина Е.Н., Мараков В.Е., Чистяков А.Н. Геомеханические критерии безопасной отработки Гремячинского месторождения калийных солей // Маркшейдерский вестник. – 2011. – № 4. – С. 44-52.
11. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей: утв. ПАО «Уралкалий», ЗАО «Верхнекамская калийная компания», ООО «ЕвроХим-Усольский Калийный комбинат». – введ. в действие 30.03.2017 в ред. 2014 г. – Пермь; Березники, 2014. – 130 с.