

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ОБРАЗЦОВ СИЛЬВИНИТА НА ЗНАЧЕНИЕ ИХ ПРОЧНОСТИ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ ДЛЯ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПАЛАШЕРСКОГО УЧАСТКА ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ

А. И. Рысин,

ООО «ПроТех Инжиниринг», г. Санкт-Петербург, Россия,

Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ «БелГУ»), г. Белгород, Россия;

В. Н. Тюпин

Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ «БелГУ»), г. Белгород, Россия

Аннотация: Выполнена оценка применимости переходных коэффициентов при расчете предела прочности на одноосное сжатие согласно нормативным методикам для соляных горных пород. Выявлено несоответствие расчетных и эмпирических значений прочности для сильвинита и каменной соли, в связи с чем была определена необходимость получения коэффициента пересчета для данного типа пород. Представлены результаты исследований прочностных свойств образцов соляных горных пород с различным соотношением линейных размеров высоты к диаметру и формой поперечного сечения, на основании чего установлены эмпирические зависимости предела прочности на одноосное сжатие от коэффициента формы для образцов сильвинитов на примере запасов Палашерского участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Полученные результаты позволяют судить о необходимости ввода переходных коэффициентов при пересчете прочности на одноосное сжатие для образцов различного поперечного сечения и набора более весомой статистической выборки в данном исследовании.

Ключевые слова: горные породы, калийно-магниевые соли, Верхнекамское месторождение, прочность, геометрические пропорции, поперечное сечение, одноосное сжатие, форма, сильвинит, эмпирические зависимости.

Благодарности: при проведении лабораторных испытаний принимали участие А.С. Нуртдинов, А. М. Лебедева.

Для цитирования: Рысин А. И., Тюпин В. Н. Влияние геометрической формы образцов сильвинита на значение их прочности при одноосном сжатии для горно-геологических условий Палашерского участка верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №3. С. 00-00. DOI:

THE INFLUENCE OF THE GEOMETRIC SHAPE OF SYLVINITE SAMPLES ON THE VALUE OF THEIR STRENGTH UNDER UNIAXIAL COMPRESSION FOR THE MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS OF THE PALASHERSKY AREA OF THE UPPER KAMA POTASH-MAGNESIUM SALT DEPOSIT

A. I. Rysin, ProTech Engineering LLC, Saint Petersburg, Russia,

Belgorod State National Research University (NRU «BelSU»), Belgorod, Russia;

V. N. Tyupin, Belgorod State National Research University (NRU «BelSU»), Belgorod, Russia

Abstract: The applicability of transition coefficients in the calculation of uniaxial compressive strength according to normative methods for salt rocks has been evaluated. The discrepancy between calculated and empirical values of strength for sylvinite and rock salt is revealed, in connection with which the necessity of obtaining a conversion factor for this type of rocks is determined. The results of research of strength properties of salt rock samples with different ratio of linear dimensions of height to diameter and cross-sectional shape are presented, on the basis of which empirical dependences of uniaxial compression strength on shape coefficient for sylvinite samples are established on the example of the reserves of the Palashersky area of the Upper Kama potash-magnesium salt deposit. The results obtained allow us to judge the need to introduce transition coefficients when recalculating uniaxial compressive strength for samples of different cross sections, and to recruit of more significant statistical sample in this study.

Keywords: rocks, potassium-magnesium salts, Verkhnekamskoye deposit, strength, geometric proportions, cross section, uniaxial compression, shape, sylvinite, empirical dependencies.

Gratitudes: to A. S. Nurtudinov and A. M. Lebedeva for took part in the laboratory tests.

For citation: Rysin A. I., Tyupin V. N. The influence of the geometric shape of sylvinite samples on the value of their strength under uniaxial compression for the mining and geological conditions of the Palashersky area of the upper kama potash-magnesium salt deposit. Surveying and subsoil use. 2024;(3):67-71.(In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_67_71.

Опыт разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом указывает на то, что эффективность и безопасность горных работ зависит от физико-механических свойств пород, параметров трещиноватости и напряженного состояния горных массивов [1-5]. В частности, при выборе системы разработки и ее конструктивных параметров, то есть устойчивых размеров обнажений, целиков, параметров крепления выработок или камер, помимо упругих, учитываются прочностные свойства горных пород: пределы прочности на растяжение, сжатие, сдвиг, а также коэффициент крепости по М. М. Протодякову [6-8].

В практике определения механических свойств горных пород наиболее распространенными из-за простоты применения являются испытания на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$. Из-за повсеместного использования данной методики большая часть инженерных расчетов основывается на параметре прочности на одноосное сжатие. В связи с этим изучение влияющих на результаты данного испытания факторов, в том числе коэффициента формы образцов, становится актуальной задачей.

В российской практике для проведения одноосных испытаний на сжатие используется термин «образец правильной формы» (иногда – «стандартный образец»), под которым подразумевается цилиндрический или призматический (с квадратным поперечным сечением) образец с отношением высоты (h) к диаметру (d), равным 2,0. Выбор такого соотношения объясняется тем, что трение на контакте плита – порода создает неоднородное поле напряжений в приторцевой зоне образца, в результате чего она характеризуется объемным напряженным состоянием [9]. При малой высоте зоны у двух торцов сливаются в единое поле объемного напряженного состояния, и только приближение к отношению $h/d = 2$ позволяет сформироваться зоне «чистого» одноосного сжатия в центральной части образца.

В зарубежных стандартах при испытаниях на одноосное сжатие рекомендуется использовать соотношения высоты к диаметру в интервале от 2,0 до 2,5. По результатам ряда исследований методами математического моделирования наилучшим соотношением размеров образца для получения достоверных характеристик прочности породы при одноосном сжатии является $h/d \geq 3$ [10]. На участках, прилегающих к нажимным плитам, формируются зоны трехосных напряжений, на которые влияют силы трения между образцом и нажимной плитой, и лишь в центральной части образца при пропорции высоты образца к его диаметру 2 к 1 прослеживается зона напряжений, максимально близких к условиям одноосного сжатия. При увеличении высоты образца размер данной зоны увеличивается, а надежность полученных значений возрастает. Помимо соотношения h/d на величину $\sigma_{сж}$ влияет форма поперечного сечения образца в связи с различным распределением напряжений в сечении, а также тип контакта образца с нажимными плитами пресса.

Согласно отечественной нормативной документации и рекомендованным методикам, при массовых испытаниях допускаются отношения высоты к диаметру от 0,7 до 2,0, однако при обработке результатов вводится коэффициент высоты образца, который приводит все полученные данные в соответствие с результатами испытания стандартного образца [11-13]. Единый коэффициент формы унифицирует подход к испытаниям, но не позволяет учесть особенности деформирования и разрушения конкретного типа породы, в связи с чем зачастую для месторождений разрабатываются свои эмпирические коэффициенты формы [11, 14, 15].

По вопросам влияния формы поперечного сечения на результаты испытаний на сжатие существуют противоречивые мнения. В отечественных нормативных методиках не делается различий в прочностных показателях образцов с круглым и квадратным поперечным сечением при условии равенства абсолютных и относительных размеров. При этом при соблюдении равенства высот и находящихся с ними в необходимой пропорции диаметра (d) или ширины (a) квадрата торца образцы характеризуются различной площадью поперечного сечения. Соответствие испытаний таких образцов необходимо подтвердить экспериментально для конкретного вида горных пород при различных отношениях h/d или h/a .

Значительное влияние на результат испытания оказывает тип контакта. «Сухой» контакт, обеспечивающий полное сцепление, позволяет оценить прочность породы без внесения в среду дополнительных компонентов, но не всегда дает представление о реальном поведении массива. Уменьшение трения на контакте позволяет избежать возникновения зон объемного сжатия, однако результаты таких экспериментов нестабильны и дают большой разброс значений, показывая тем не менее результаты уменьшения прочности от воздействия смазок, прокладок из низко модульных материалов и увеличение прочности при использовании металлических зубчатых прокладок [9].

На калийных рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) метод определения предела прочности на сжатие лег в основу решения большей части горнотехнических вопросов. Для реализации поставленных задач необходимо установить объективность величины $\sigma_{сж}$ при различном соотношении h/d и различной форме поперечного сечения образцов.

Цель исследования: определение степени влияния соотношений h/d , h/a испытуемых образцов сильвинитов ВКМКС и формы поперечного сечения на прочность при одноосном сжатии.

Методы исследований. Анализ ранее выполненных исследований на предмет влияния геометрических параметров образцов на предел прочности на сжатие. Экспериментальные исследования по установлению влияния геометрических параметров образцов сильвинитов на $\sigma_{сж}$. Получение эмпирических зависимостей $\sigma_{сж} = f(h/d)$ для образцов, представленных сильвинитом круглой и квадратной формы.

Общие положения

Приведение данных испытаний образцов с различными геометрическими параметрами к единой характеристике регламентируется двумя основными документами. Одним из них является основной нормативный документ для планирования горных работ в пределах Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей «Указания по защите рудников от затопления...» [11], расчетный аппарат которых отличен от методики ГОСТ 21153.2-84 «Методы определения предела прочности при одноосном сжатии», п. 1.5.1, в которой значение предела прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж\text{и}}$ в МПа для каждого i -го образца выборки вычисляют по формуле

$$\sigma_{сж\text{и}} = K_g \times \frac{P}{S} \times 10, \quad (1)$$

где P — сила, разрушающая образец, кН; S — площадь поперечного сечения образца, см²; K_g — безразмерный коэффициент высоты образца.

Значения коэффициента K_g при отношении высоты образца к его диаметру M устанавливают по таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Значения коэффициента высоты образца (K_g) при отношении высоты образца к его диаметру (M)

Values of the height coefficient of the sample (K_g) at the ratio of the height of the sample to its diameter (M)

Показатель	Значение								
M	0,70	0,80	0,90	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
K_g	0,68	0,72	0,76	0,80	0,86	0,90	0,94	0,97	1,00

Важным является тот факт, что в отечественных нормативных методиках оптимальным для определения предела прочности на сжатие считается соотношение продольных размеров образца к поперечным в пропорции 2 к 1. В то же время в зарубежных стандартах и научно-исследовательских статьях рекомендуется испытывать образцы в пропорции от 2,5 к 1.

Условия проведения экспериментальных исследований

В целях получения достоверных результатов и с учетом множества факторов, влияющих на прочностные характеристики силвинита в условиях Палашерского участка ВКМКС, для оптимизации количества экспериментов и обеспечения необходимой точности испытания выполнены следующие мероприятия:

- ✧ исследовано влияние отношения размеров и формы образца на значение предела прочности на сжатие;
- ✧ проведены эксперименты при постоянных температуре и влажности окружающей среды;
- ✧ изготовлены испытательные образцы с одинаковыми типоразмерами в рамках, определенных программой геометрических параметров с высокой точностью, удовлетворяющей всем требованиям ГОСТ 21153.2-84;
- ✧ изготовлены образцы таким образом, чтобы они имели визуальную аналогичность с с похожей структурой, слоистостью и составом горных пород;
- ✧ отобраны пробы для изготовления образцов с одного и того же участка шахтного поля для исключения зна-

чительных колебаний содержания нерастворимого остатка, KCl, NaCl, мощности пласта и слоя, складчатости и глубины залегания;

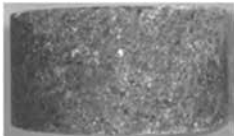
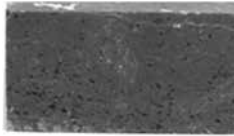
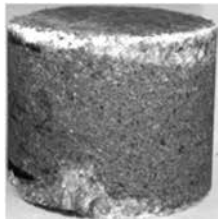
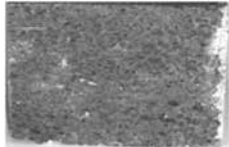
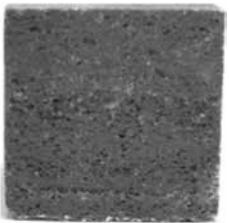
- ✧ осуществлен комплекс мгновенных испытаний (определение предела прочности на одноосное сжатие по методике ГОСТ 21153.2-84).

Результаты исследований

Общий вид образцов, отнесенных к разным по своим пропорциям группам, приведен в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Общий вид образцов
General view of the samples

h/d	Тип поперечного сечения	
	Круг	Квадрат
0.5		
0.7		
1.0		
1.5		
2.0		

Общее количество проведенных на текущем этапе работ испытаний для определения влияния отношения размеров образца — 70 образцов.

Статистическая обработка полученных результатов выполнена по выделенным группам образцов сильвинита согласно ГОСТ 21153.2-84.

На рисунке 1 приведены результаты всех проведенных испытаний сильвинита и логарифмической зависимости полученных средних показателей прочности на одноосное сжатие от коэффициента формы для образцов сильвинита круглого и квадратного сечений. Для построения зависимости использованы результаты 58 испытаний, отобранных после статистической обработки.

Математическая обработка результатов исследований позволила получить эмпирические формулы расчета предела прочности круглых и квадратных образцов сильвинитов в зависимости от соотношения h/d .

Для круглого сечения:

$$\sigma_{сж} = 42,217 - 22,39 \cdot \ln(h/d), \text{ МПа.} \quad (2)$$

Для квадратного сечения:

$$\sigma_{сж} = 42,964 - 16,08 \cdot \ln(h/d), \text{ МПа.} \quad (3)$$

Стоит отметить, что интенсивность спада прочности при различных поперечных сечениях по имеющейся на текущий момент выборке различна, что может привести к необходимости ввода переходного поправочного коэффициента. Для увеличения надежности полученных результатов необходимо расширить статистику по испытаниям призматических образцов с коэффициентом формы $h/d > 2,0$ для уточнения вида зависимости и определения наиболее надежного с точки зрения получения прочностных свойств сильвинита значения коэффициента формы.

Выводы

Исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Проведены обзор предыдущих исследований и анализ применимости переходных коэффициентов при расчете предела прочности на одноосное сжатие установленных в ГОСТ для соляных горных пород. Установлена необходимость определения коэффициента формы для образцов сильвинита нестандартной формы.

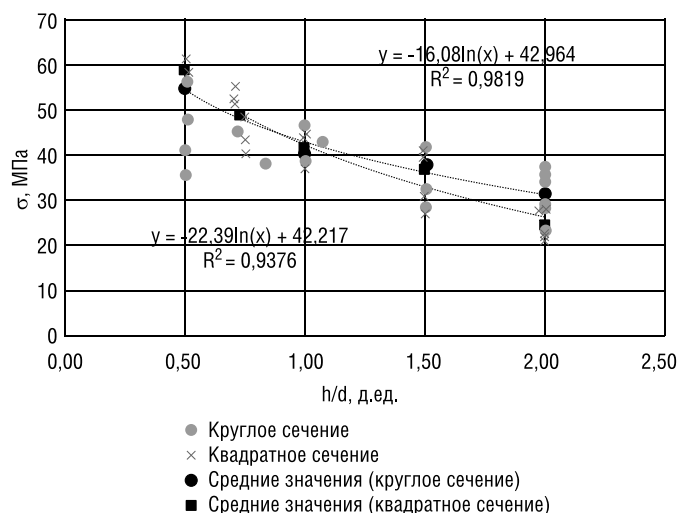


Рис. 1. Зависимость прочности сильвинита на одноосное сжатие от коэффициента формы (h/d)

Fig. 1. Dependence of the strength of sylvinitе in uniaxial compression on the shape coefficient (h/d)

2. Анализ полученных результатов говорит о необходимости учета формы поперечного сечения образцов при расчете значения прочности на одноосное сжатие. Кривые аппроксимации полученных данных различны для круглого и квадратного сечения образцов.

3. Установлены эмпирические зависимости изменения предела прочности на одноосное сжатие от пропорций линейных размеров образцов сильвинитов на примере запасов Палашерского участка ВКМКС.

4. Вне зависимости от формы поперечного сечения образцов при соотношении h/d (h/a) в пропорции 2 к 1 при текущей выборке данных тенденции к установлению постоянной величины предела прочности на одноосное сжатие не выявлено. Целесообразно продолжить исследования при больших значениях коэффициента формы образцов.

5. Установлена потребность ввода для расчета предела прочности на одноосное сжатие сильвинитов Палашерского участка ВКМКС переходных коэффициентов, отличных от принятой нормативной документации. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Ветров, С. В. Допустимые размеры обнажений горных пород при подземной разработке руд / С. В. Ветров. - М.: Наука, 1975. - 232 с.
2. Булычев, Н. С. Проектирование и расчет крепи капитальных выработок / Н. С. Булычев, Н. Н. Фолиевая, Е. В. Стрельцов. - М.: Недра, 1986. - 288 с.
3. Баранов, О. А. Расчет параметров технологических процессов подземной добычи руд / О. А. Баранов. - М.: Недра, 1985. - 224 с.
4. Ломоносов, Г. Г. Производственные процессы подземной разработки месторождений / Г. Г. Ломоносов. - 2-е изд. - М.: Горная книга, 2013. - 517 с.
5. Певзнер, М. Е. Геомеханика / М. Е. Певзнер, М. А. Иофис, В. Н. Попов. - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2005. - 438 с.
6. Слепцов, М. Н. Подземная разработка месторождений цветных и редких металлов / М. Н. Слепцов, Р. Ш. Азимов, В. Н. Мосинец. - М.: Недра, 1986. - 206 с.
7. Тюпин, В. Н. Установление динамически устойчивых размеров обнажений трещиноватого напряженного горного массива при камерных вариантах систем разработки / В. Н. Тюпин // Вестник Забайкальского государственного университета. - 2016. - Т. 22, № 6. - С. 31-39.
8. Тюпин, В. Н. Установление динамически устойчивых размеров междуканальных целиков при камерных вариантах систем разработки / В. Н. Тюпин, Т. И. Рубашкина // Вестник Забайкальского государственного университета. - 2016. - Т. 22, № 5. - С. 15-22.
9. Барях, А. А. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения / А. А. Барях, В. А. Асанов, И. Л. Паньков. - Пермь, 2008. - 199 с.

10. Kashf, M. Evaluation of sample scale effect on geomechanical tests / M. Kashf, S. Shad, D. Zivar // *Petroleum Research*. - 2022. - Vol. 12. - P. 527-535.
11. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / ГИ Уро РАН, 2014. - Пермь; Березники, 2014. - 130 с.
12. Проскуряков, Н. М. Физико-механические свойства соляных пород / Н. М. Проскуряков, Р. С. Пермьяков, А. К. Черников. - Л.: Недра, 1973. - 271 с.
13. Кузнецов, Н. Н. О влиянии отношения размеров образцов скальных горных пород на результаты определения их прочности при одноосном сжатии / Н. Н. Кузнецов, А. К. Пак // *Вестник МГТУ*. - 2014. - Т. 17, № 2. - С. 246-253.
14. Морозов, И. А. Уточнение коэффициента формы соляных пород Гремячинского месторождения / И. А. Морозов // *Горное эхо*. - 2022. - № 3. С. 19-24.
15. Паньков, И. Л. О новом коэффициенте формы, учитывающем размеры прямоугольных образцов горных пород / И. Л. Паньков // *Горное эхо*. - 2021. - № 1. - С. 60-63.

REFERENCES

1. Vetrov SB. Permissible size of rocky outcrops in underground mining. Moscow: Nauka, 1975 (In Russ.).
2. Bulychev N, Fotieva N, Streltsov O. Design and calculation of fixed workings. Moscow: Nedra, 1986 (In Russ.).
3. Baranov O. Calculation of parameters of technological processes of underground mining of ores. Moscow: Nedra, 1985 (In Russ.).
4. Lomonosov G. G. Production processes of underground mining. Second edition. Moscow, 2013 (In Russ.).
5. Pevzner MY, Iosif MA, Popov VN. Geomechanik. Moscow: Publishing House of Moscow State Mining University, 2005 (In Russ.).
6. Sleptsov M, Azimov RSh, Mosinets VN. Underground development of non-ferrous and rare metals deposits. Moscow: Nedra, 1986 (In Russ.).
7. Tyupin V. Establishment of dynamically steady sizes of exposures of the jointed intense massif at chamber options of systems of development. *Bulletin of Transbaikal state university*. 2016;22(6):31-9 (In Russ.).
8. Tyupin V, Rubashkina T. Establishing of a dynamically stable size interchamber pillars in chamber versions of development systems. *Bulletin of Transbaikal state university*. 2016;22(5):15-22 (In Russ.).
9. Baryakh A, Asanov V., Pankov I. Physical and mechanical properties of salt rocks of the Upper Kamsk potassium deposit. Perm, 2008 (In Russ.).
10. Kashf M, Shad S, Zivar D. Evaluation of sample scale effect on geomechanical tests. *Petroleum Research*. 2022;(12):527-35.
11. Mining Institute of the Ural Department of the Russian Academy of Sciences. Instructions for protecting mines from flooding and protecting undermined objects in the conditions of the Verkhnekamsk deposit of potassium-magnesium salts, 2014. Perm, 2014 (In Russ.).
12. Proskuryakov N, Permyakov R, Chernikov A. Physico-mechanical properties of salt rocks. Leningrad: Nedra, 1973 (In Russ.).
13. Kuznetsov N, Pak A. Influence of the hard rock specimens' ratio of the results. *Bulletin of Moscow State Technical University*. 2014;17(2);246-53 (In Russ.).
14. Morozov IA. Clarification of the shape coefficient of salt rocks of the Gremyachinskoe deposit. *Mountain Echo*. 2022;(3):19-24 (In Russ.).
15. Pankov I. On a new shape coefficient that takes into account the dimensions of rectangular rock samples. *Mining Echo*. 2021;(1):60-3 (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тюпин Владимир Николаевич:

доктор технических наук,
профессор,
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет,
г. Белгород, Россия,
ORCID ID 0000-0002-3709-0957

Рысин Александр Игоревич:

аспирант,
руководитель лаборатории,
ФМСГП ООО «ПроТех Инжиниринг»,
г. Санкт-Петербург, Россия;
НИУ БелГУ,
г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tyupin Vladimir Nikolaevich:

Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Belgorod State National Research University,
Belgorod, Russia,
ORCID ID 0000-0002-3709-0957

Rysin Aleksandr Igorevich:

postgraduate student,
head of laboratory of physics and mechanics of rock properties,
LPMRP ProTech Engineering LLC,
Saint Petersburg, Russia;
Belgorod State National Research University,
Belgorod, Russia

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

В. Н. Тюпин — постановка задачи исследования, редакция текстового и материала статьи; А. И. Рысин — планирование и выполнение эксперимента, обработка результатов и выявление закономерностей.

V. N. Tyupin — setting the research problem, editing the text and material of the article; A. I. Rysin — planning and performing an experiment, processing results and identifying patterns

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.