

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2022.2.88-97>

EDN LGRAVP

УДК 622.276.031.011.43:550.822.3

## **Влияние размеров образца горной породы на анизотропию прочностных свойств**

*Алиев М.М., Исмагилова З.Ф., Бурмистрова Н.Н., Созонтова Е.А.*

*Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск, Россия*

## **Influence of rock sample size on anisotropy of strength properties**

*M.M. Aliev, Z.F. Ismagilova, N.N. Burmistrova, E.A. Sozontova*

*Almetyevsk State Petroleum Institute, Almetyevsk, Russia*

**E-mail: nataliyavika@yandex.ru**

**Аннотация.** В работе рассматриваются вопросы влияния основных размеров образцов горных пород, обладающих свойством изменчивости их прочности от направления, связанной с анизотропией. Такая работа выполняется обычно для изотропных пород, но также представляет интерес исследования в этой области, когда анизотропия прочностных свойств значительна. Для решения представленной задачи исходные данные заимствованы из работ других авторов. В одной из этих работ отношение высоты на диаметр изменяется в широких пределах. В дальнейшем был использован критерий разрушения, представляющий собой обобщение классического линейного критерия Кулона-Мора, с помощью которого определены прочностные сдвиговые свойства и угол внутреннего трения по разным направлениям, не проводя экспериментов. Также было выполнено решение задачи в условиях изменения бокового давления и по определению разрушающего давления в различных отношениях бокового и разрушающего давлений. Расчеты показывают, что влияние размеров образца в большей степени оказывает случай, когда при различных боковых давлениях разрушающее давление ощущимо поперек или вдоль слоев. В промежуточных случаях в пределах от  $30^0$  до  $60^0$  это влияние минимально.

**Ключевые слова:** *анизотропия, размер образца, прочность, нагрузка, слои, сжатие, горная порода, критерий прочности*

**Для цитирования:** Алиев М.М., Исмагилова З.Ф., Бурмистрова Н.Н., Созонтова Е.А. Влияние размеров образца горной породы на анизотропию прочностных свойств//Нефтяная провинция.-2022.-№2(30).-С.88-97. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2022.2.88-97>. - EDN LGRAVP

---

© Алиев М.М., Исмагилова З.Ф., Бурмистрова Н.Н., Созонтова Е.А., 2022

**Abstract.** Effect of dimensions of rock samples characterized by anisotropy-associated variations in strength vs. direction is discussed. Subjects of such studies are isotropic rocks, as a rule, however, when anisotropy of strength properties is high, findings of research can be of interest. For this study, input data from published literature were used. Some authors mention that aspect ratio changed over a wide range. Failure criterion, which is essentially a generalization of a classical Mohr–Coulomb linear criterion, was used to determine shear strength and angles of internal friction along various directions. No physical experiments were performed. The problem was solved for conditions of lateral thrust variations; failure pressure for different lateral thrust – failure pressure ratios was determined. Calculations show that the effect of dimensions of rock samples is mostly pronounced when failure pressure is notable across or along the layers at different lateral thrust. In the range of 30° to 60°, the effect is minimal.

**Key words:** *anisotropy, sample size, strength, load, layers, compression, rock, strength criterion*

**For citation:** M.M. Aliev, Z.F. Ismagilova, N.N. Burmistrova, E.A. Sozontova Vlijanie razmerov obrazca gornoj porody na anizotropiju prochnostnyh svojstv [Influence of rock sample size on anisotropy of strength properties]. Neftyanaya Provintsiya, No. 2(30), 2022. pp. 88-97. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2022.2.88-97>. EDN LGRAVP (in Russian)

## Введение

В работе [4] было исследовано влияние размеров образцов горных пород на прочность при одноосном сжатии с регулируемой скоростью нагружения. Обнаружено, что размер образцов и скорость нагружения оказывают существенное влияние не только на значения прочности, но и на свойства деформируемости горных пород.

В работе [5] представлены результаты испытаний кернов различных литологических типов. Данное исследование показало переменное влияние размера, отношения высоты к диаметру и формы образца породы на прочность при одноосном сжатии. Одной из причин таких результатов может быть первичная минералогическая и структурная неоднородность пород.

Исследованиями Ермоловича Е.А. и др. было показано, что предел прочности при одноосном сжатии пещего мела уменьшается с увеличением диаметра образца [6]. Что нельзя сказать о граните, который испытывает значительный обратный эффект размера: предел прочности увеличива-

ется с увеличением диаметра образца до определенного значения, но потом уменьшается [7].

Однако для образцов мрамора и песчаника средняя прочность с изменением размеров образцов практически остается постоянной [8].

На прочностные характеристики горных пород оказывает влияние не только боковое давление, но и температура испытаний. Установлено, что при отрицательных температурах все прочностные и деформационные показатели пород возрастают [9].

О влиянии отношения размеров образцов горных пород на результаты определения их прочности при одноосном сжатии обсуждались многими учеными. Об этой проблеме идет речь в работе [10], где были исследованы образцы различных типов пород с разным соотношением длины к диаметру. Рекомендовано уравнение для корректировки значений прочности для более коротких образцов.

Масштаб породы влияет на результаты неограниченной прочности на сжатие. В этой статье [11] обсуждается зависимость свойств горных пород от размера и формы образца.

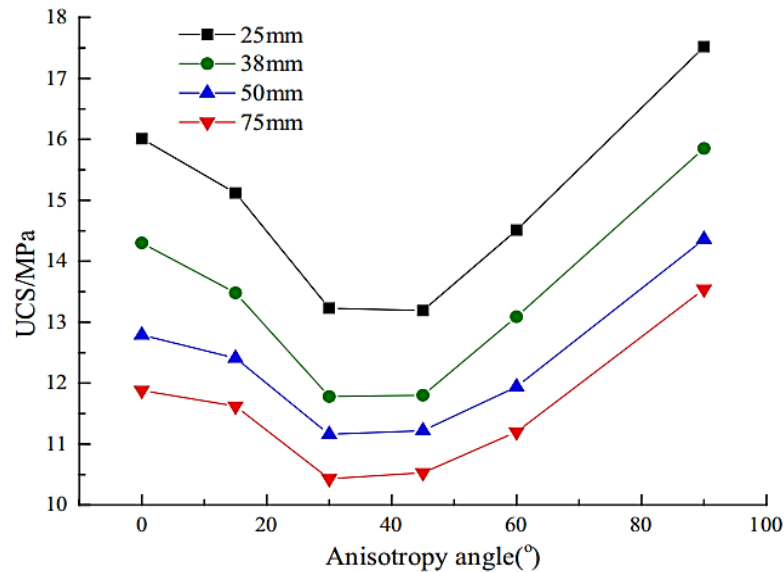
Проведенные исследования [12] показали, что размеры образцов таких горных пород, как алевролиты, песчаники и их прослойки, а также формы их торцов влияют на предел прочности при растяжении.

Влияние направления нагружения и размера образца на анизотропию прочности породы рассмотрены в работе [1]. Для сильно анизотропных горных пород, как уголь, прочность определялась под разными углами. На основе экспериментальных данных [13] была установлена зависимость значений прочности от соотношения диаметра и высоты образца (Рис. 1).

Как известно, увеличение бокового давления вызывает повышение разрушающей нагрузки. Такая закономерность придерживается во всех известных критериях разрушения горных пород.

Достоверность проведенных экспериментов на трехосное сжатие,

связано в первую очередь с наличием образцов-двойников (близнецов). При отсутствии достаточного количества таких образцов можно исходить из минимальных результатов простых испытаний, например испытаний при неограниченном сжатии. Исходя из этого, в работе принято решение теоретически найти разрушающую нагрузку, изменяя боковое давление, согласно теории [1].



**Рис. 1. Кривые зависимости анизотропии прочности от угла анизотропии в образцах угля с разными размерами**

В этой работе [1] рассматривается критерий прочности слоистой среды в следующем виде

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4(\Pi_1^2 + \Pi_2^2), \quad (1)$$

где  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  – функции, зависящие от некоторого угла  $\psi$  и прочностных характеристик породы, которые зависят от этого угла.

Упрощенный вид критерия (1) при постоянном значении угла внутреннего трения имеет вид

$$\begin{aligned} (\sigma_1 - \sigma_3)^2 (\cos 2\alpha + \kappa \sin 2\alpha)^2 + [(\sigma_1 - \sigma_3)(\sin 2\alpha - \kappa \cos 2\alpha) + (c_0 - c_{90})]^2 \\ = [(\sigma_1 + \sigma_3)\kappa + c_0 + c_{90}]^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\kappa = \operatorname{tg} \rho = \operatorname{const}$ ;  $\alpha$  – угол между  $\sigma_1$  и осью  $x$ , которая совпадает с направлением наименьшего сопротивления;

$c_0, c_{90}$  - сцепления вдоль и поперек слоистости;

$\sigma_1$  и  $\sigma_3$  - главные напряжения.

Заметим, что при  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$  по критерию (2) можно получить разные значения разрушающего напряжения, что на практике подтверждается.

Дальнейшие исследования показывают, что для определения характеристик, входящих в (2), расчетным путем достаточно результатов трех испытаний на одноосное (неограниченное) сжатие образцов горной породы.

На графике (Рис. 2) представлены зависимости напряжения  $\sigma_1$  от угла  $\beta$  при различных боковых давлениях для образцов диаметром 25 мм (сплошная линия-образец 1) и 75 мм (пунктирная линия-образец 2). Причем, отношение высоты образца к его диаметру 2.

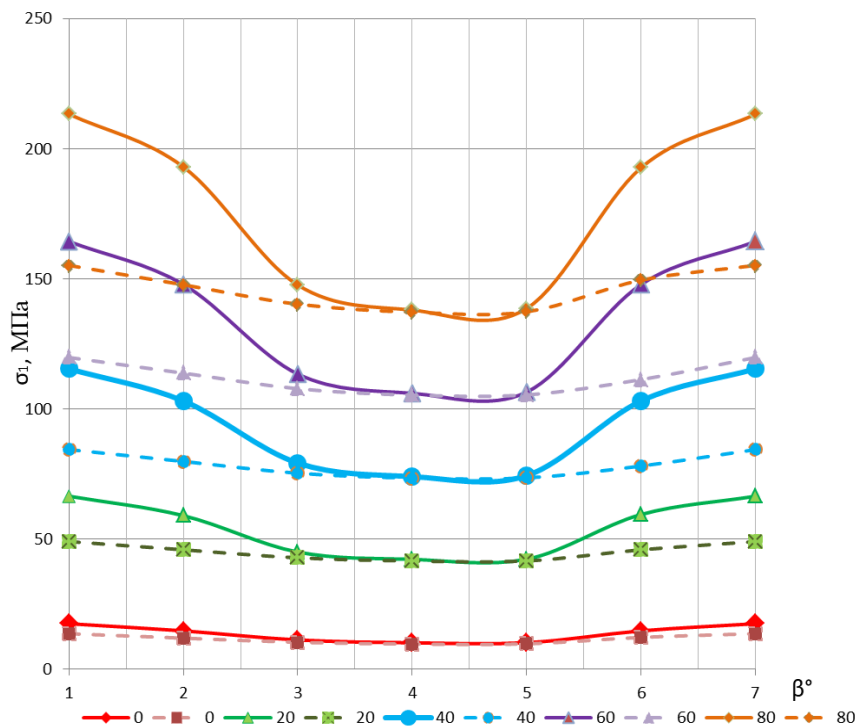


Рис. 2. График зависимости  $\sigma_1$  и  $\beta$  при одноосном сжатии

Для линии 1 (Рис. 2) принимаем результаты трех испытаний в условиях одноосного сжатия под углами  $60^\circ, 45^\circ, 0^\circ$ . Подставляя эти значения в

формулу (2) получим систему из трех линейных уравнений, совместным решением которых вычисляется  $\rho_{90}, c_0, c_{90}$ .

Уточнение значения угла внутреннего трения поперек слоев ( $\rho_0$ ) производится, используя критерий (1). Аналогично определяются исходные характеристики для линии 2 (Рис. 2).

Тогда с помощью критерия (1) и результатов исходных характеристик, теоретическим путем можно определить разрушающую нагрузку при разных боковых давлениях (Табл. 1).

Таблица 1

*Зависимость между  $\sigma_1$  и  $\beta^\circ$  при различных значениях  $\sigma_3$*

$\sigma_3$ , МПа	Данные	$\beta^\circ$						
		0	15	30	45	60	75	90
0	образец 1	17,55	14,8	11,3	10,2	10,25	14,8	17,55
	образец 2	13,7	12	10,4	9,7	9,8	12,3	13,7
20	образец 1	66,53	59,07	45,07	42,27	42,33	59,52	66,53
	образец 2	49,1	45,95	42,87	41,62	41,67	45,95	49,1
40	образец 1	115,46	103,14	79,25	74,1	74,44	103,14	115,46
	образец 2	84,46	79,89	75,35	73,49	73,57	78,15	84,46
60	образец 1	164,39	147,9	113,45	106,08	106,55	147,9	164,39
	образец 2	119,84	113,82	107,82	105,37	105,47	111,35	119,84
80	образец 1	213,33	193,05	147,66	138,06	138,67	192,78	213,33
	образец 2	155,21	149,76	140,3	137,24	137,38	149,55	155,21

Из рис. 2 видно, что при углах  $60^\circ$  и  $45^\circ$  значения разрушающей нагрузки независимо от размеров образца практически совпадают, а при  $0^\circ$  происходит расхождение нагрузки в 1,3 раза. Следовательно, при испытании образцов керна разных размеров, можно получить отличительные значения разрушающей нагрузки с увеличением бокового давления.

В работе [2] приведены результаты экспериментальных и заимствованных из других источников [3] данных испытаний образцов керна на одноосное (неограниченное) сжатие под различными углами действия сжимающего напряжения относительно слоев. Подобные графики как на рис. 2 были построены для кварцевого филлита (Рис. 3). Анализ показал что, критерий (1) достоверен и согласуется с данными экспериментов.

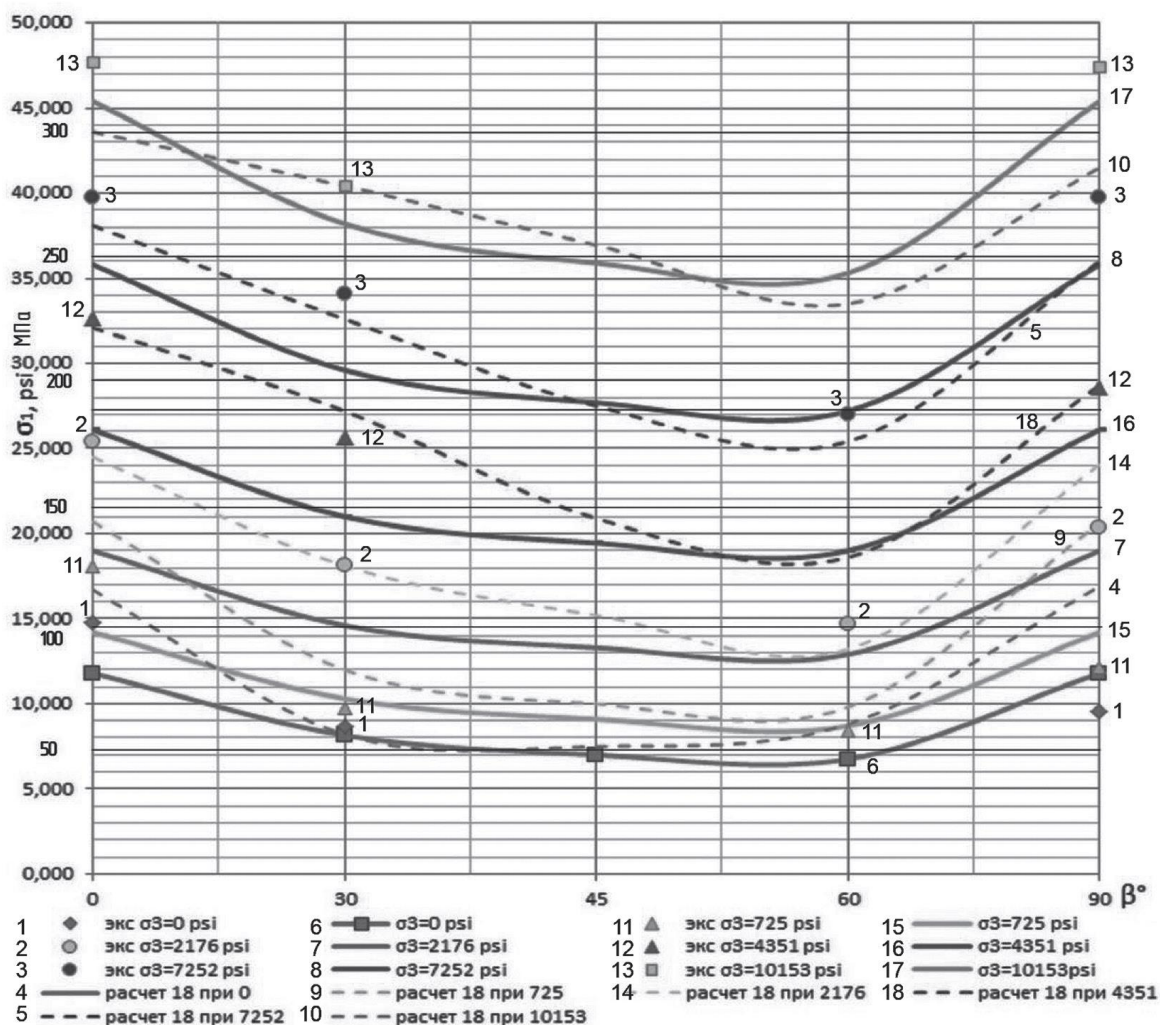


Рис. 3. График зависимости  $\sigma_1$  и  $\beta$  при трехосном сжатии

### Рекомендации

Размеры образцов при испытаниях на прочность существенно влияют на разрушающую нагрузку. Особенно это заметно, когда эта нагрузка направлена вдоль или поперек анизотропии. В случае сжатия с боковым давлением 80 МПа предельная нагрузка увеличивается на 30% для образца 1. При испытаниях под боковым давлением независимо от размера образца разрушающие нагрузки почти совпадают при наклоне плоскостей анизотропии от  $20^\circ$  до  $45^\circ$  к направлению вертикальной нагрузки.

Таким образом, отпадает необходимость испытывать образцы разных размеров при таких углах.

## Список литературы

1. Алиев М.М., Гениев Г.А., Расчет несущей способности анизотропных оснований сооружений. Известия ВУЗов. Строительство № 6 - Новосибирск, 2001. С. 18-22.
2. Алиев М. М., Исмагилова З. Ф., Бурмистрова Н. Н. Геомеханические модели сдвигового разрушения многослойных горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2020. - № 8. - С. 52-61. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-52-61>.
3. Ramamurthy, T., 1993. Strength and modulus responses of anisotropic rocks. Comprehensive rock engineering. Pergamon Press, Oxford, Vol. 1, p. 313-329.
4. Komurlu, E., 2018, Loading rate conditions and specimen size effect on strength and deformability of rock materials under uniaxial compression. Geo-Engineering 9, Paper no: 17, 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0085-z>
5. Durmeková, T., Bednarik, M., Dikejová, P. et al. Influence of specimen size and shape on the uniaxial compressive strength values of selected Western Carpathians rocks. Environ Earth Sci 81, 247 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10373-1>
6. Влияние размеров образца на прочность мела Е.А. Ермолович, А.В. Овчинников, А.А. Аникеев, В.В. Хаустов - ЖУРНАЛ Известия Тульского государственного университета. Науки о земле 2020. - №2. - С. 263-271.
7. J. Quiñones, J. Arzúa, L. Alejano, F. G. Bastante, D. Mas Ivars, G. Walton, 2017, Analysis of size effects on the geomechanical parameters of intact granite samples under unconfined conditions. Acta Geotechnica 12(2), p. 1229-1242. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0531-7>
8. Д.В. Зайцев, А.Н. Кочанов, Ш.Ж. Токтогулов, И.А. Пантелеев, П.Е. Панфилов Влияние масштабного эффекта и неоднородности горных пород при определении их прочностных свойств // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2016. - № 11. - С. 208-215.
9. Полюлян А.С. Исследование физико-механических свойств пород контрольно-стволовых скважин половодовского участка ВКМКС // International Scientific Review № 11(21) / International Scientific Review of the Problems and Prospects of Modern Science and Education: XIX International Scientific and Practical Conference (New York, USA - 22 July, 2016, p.101-103).
10. Ergün Tuncay, Nazlı Tunar Özcan, Ayca Kalender, 2019, An approach to predict the length-to-diameter ratio of a rock core specimen for uniaxial compression tests. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 26, Vol. 78, p.5467–5482. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01482-6>
11. Alaa H. J. Al-Rkaby, Z.M.S. Alafandi., 2015, Size effect on the unconfined compressive strength and modulus of elasticity of limestone rock. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 20, p. 1393-1401.
12. V. Shalamanov, M. Shabdanov., 2020, The influence of the ratio of dimensions of rock samples on their tensile strength. Vth International Innovative Mining Symposium, E3S Web of Conferences 174:01041. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401041>
13. Song, H., Jiang, Y., Elsworth, D., Zhao, Y., Wang, J., & Liu, B. (2018). Scale effects and strength anisotropy in coal. International Journal of Coal Geology, 195, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.05.006>

## References

1. Aliev M.M., Geniev G.A. *Raschet nesushchei sposobnosti anizotropnykh osnovaniy sooruzheniy* [Calculation of bearing capability of structures' anisotropic foundations].



- Izvestiya Vysshykh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitelstvo [News of higher educational institutions. Construction]. Novosibirsk. 2001. pp. 18-22. (in Russian)
2. Aliev M.M., Ismagilova Z.F., Burmistrova N.N. *Geomekhanicheskie modeli sdvigovogo razrusheniya mnogoslownykh gornykh porod* [Geomechanical models of shear fracture of multilayer rocks]. Gornyi Informatsionno-Analiticheskiy Bulletin [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2020, No. 8. pp. 52-61. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-52-61>. (in Russian)
  3. Ramamurthy, T., 1993. Strength and modulus responses of anisotropic rocks. Comprehensive rock engineering. Pergamon Press, Oxford, Vol. 1, p. 313-329.
  4. Komurlu, E., 2018, Loading rate conditions and specimen size effect on strength and deformability of rock materials under uniaxial compression. Geo-Engineering 9, Paper no: 17, 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0085-z>
  5. Durmeková, T., Bednarik, M., Dikejová, P. et al. Influence of specimen size and shape on the uniaxial compressive strength values of selected Western Carpathians rocks. *Environ Earth Sci* 81, 247 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10373-1>
  6. Ermolovich E.A., Ovchinnikov A.V., Anikeev A.A., Khaustov V.V. *Vliyanie razmerov obrazca na prochnost mela* [Influence of sample dimensions on chalk strength]. *Izvestiya Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o zemle* [News of Tula State University. Geosciences]. 2020, No. 2. pp. 263-271. (in Russian)
  7. J. Quiñones, J. Arzúa, L. Alejano, F. G. Bastante, D. Mas Ivars, G. Walton, 2017, Analysis of size effects on the geomechanical parameters of intact granite samples under unconfined conditions. *Acta Geotechnica* 12(2), p. 1229-1242. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0531-7>
  8. Zaitsev D.V., Kochanov A.N., Toktogulov Sh.Zh., Pantelev I.A., Panfilov P.E. *Vliyanie masshtabnogo effekta i neodnorodnosti gornykh porod pri opredelenii ikh prochnostnykh svoystv* [Influence of scale effect and heterogeneity of rocks to determine their strength properties]. Gornyi Informatsionno-Analiticheskiy Bulletin [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2016, No. 11. pp. 208-215. (in Russian)
  9. Polyulyan A.S. *Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv porod kontrolno-stvolovykh skvazhin polovodovskogo uchastka VKMKS* [Study of physical and strength properties of rock samples from pilot holes in Verkhne-Kamskoye potassium salt field, Polovodsky area]. International Scientific Review No. 11(21). International Scientific Review of the Problems and Prospects of Modern Science and Education: XIX International Scientific and Practical Conference (New York, USA - 22 July, 2016. pp.101-103).
  10. Ergün Tuncay, Nazlı Tunar Özcan, Aycan Kalender, 2019, An approach to predict the length-to-diameter ratio of a rock core specimen for uniaxial compression tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 26, Vol. 78, p.5467–5482. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01482-6>
  11. Alaa H. J. Al-Rkaby, Z.M.S. Alafandi., 2015, Size effect on the unconfined compressive strength and modulus of elasticity of limestone rock. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 20, p. 1393-1401.
  12. V. Shalamanov, M. Shabdanov., 2020, The influence of the ratio of dimensions of rock samples on their tensile strength. Vth International Innovative Mining Symposium, E3S Web of Conferences 174:01041. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401041>
  13. Song, H., Jiang, Y., Elsworth, D., Zhao, Y., Wang, J., & Liu, B. (2018). Scale effects and strength anisotropy in coal. *International Journal of Coal Geology*, 195, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.05.006>

### **Сведения об авторах**

*Алиев Мехрали Мирзали оглы*, доктор технических наук, профессор, Альметьевский государственный нефтяной институт  
Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина, 2  
E-mail: aliev@agni-rt.ru

*Исмагилова Зульфия Фаритовна*, кандидат технических наук, доцент, Альметьевский государственный нефтяной институт  
Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина, 2  
E-mail: iiii.iskandar@inbox.ru

*Бурмистрова Наталия Николаевна*, старший преподаватель, Альметьевский государственный нефтяной институт  
Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина, 2  
E-mail: nataliyavika@yandex.ru

*Созонтова Екатерина Андреевна*, аспирант кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», Альметьевский государственный нефтяной институт  
Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина, 2  
E-mail: sozontova2608@mail.ru

### **Authors**

*M.M. Aliev*, Doctor, Professor, Almetьевsk State Oil Institute  
2, Lenin st., Almetьевsk, 423450, Russian Federation  
E-mail: aliev@agni-rt.ru

*Z.F. Ismagilova*, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Almetьевsk State Oil Institute  
2, Lenin st., Almetьевsk, 423450, Russian Federation  
E-mail: iiii.iskandar@inbox.ru

*N.N. Burmistrova*, Senior Lecturer,  
2, Lenin st., Almetьевsk, 423450, Russian Federation  
E-mail: nataliyavika@yandex.ru

*E.A. Sozontova*, Postgraduate student of the Department «Oil and Gas Transportation and Storage», Almetьевsk State Oil Institute  
2, Lenin st., Almetьевsk, 423450, Russian Federation  
E-mail: sozontova2608@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 18.05.2022*  
*Принята к публикации 18.06.2022*  
*Опубликована 30.06.2022*