

Леконцев Юрий Михайлович<sup>1</sup>, кандидат техн. наук, Хорешок Алексей Алексеевич<sup>2</sup>, доктор техн. наук, профессор, Сажин Павел Васильевич<sup>1\*</sup>, кандидат техн. наук, Мезенцев Юрий Борисович<sup>3</sup>, главный горняк ОАО «ПМХ – Уголь»

<sup>1</sup> Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

<sup>3</sup> ОАО «ПМХ – Уголь», ул. 1я Стахановская, 1а, 650021, г. Кемерово, Россия

\*E-mail: pavel301080@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАКЕРОВ НА ОСЕВОЕ СЖАТИЕ

**Аннотация:** Приведена конструкция устройства, разработанного и запатентованного в ИГД СО РАН им. Н.А. Чинакала, позволяющая проводить гидроразрывы по всей длине скважины с интервалами, предусмотренными технологическими расчетами. Описан процесс работы уплотнительных элементов уравновешенного герметизатора в условиях осевого сжатия на примере устройства, разработанного в ИГД СО РАН им. Н.А. Чинакала. Схематически представлен лабораторный стенд для исследования образцов втулок, выполненных из полиуретана. По результатам лабораторных исследований показаны сравнительные виды деформаций тонкостенных металлических цилиндров и втулок из полиуретана под действием статического осевого нагружения. Приведены теоретические расчеты изменения геометрических размеров образцов в виде полых цилиндров из эластомеров в перпендикулярном направлении к приложенной силе. Определены критерии расчета геометрических параметров герметизирующих втулок для пакерных устройств и оптимального силового воздействия, исключающего потерю их устойчивости при осевом сжатии, а следовательно, исключению их «заклинивания» в рабочей скважине. Выполнен теоретический расчет максимальной силы осевого нагружения на примере полиуретанового образца в виде полый цилиндрической втулки с геометрическими размерами:  $d = 72$  мм,  $L = 200$  мм и  $\delta = 18$  мм и сделано сравнение со стендовыми испытаниями образцов.

**Ключевые слова:** уравновешенный герметизатор, уплотнительный элемент, пакер, поинтервальный гидроразрыв.

**Информация о статье:** принята 26 января 2021 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-4-3-8

Полиуретаны нашли широкое применение практически во всех отраслях промышленности, так как обладают высокой способностью к упругопластическим деформациям и являются безальтернативными во многих конструкциях современных механизмов и машин [1-3].

В ИГД СО РАН им. Н.А. Чинакала на основе полиуретанов разработаны пакерные устройства (уравновешенные герметизаторы), предназначенные для герметизации участков скважин и шпуров,

пройденных в прочном породном или угольном массивах для проведения поинтервальных гидроразрывов [4-9].

Схема одного из применяемых на угольных шахтах пакерных устройств представлена на рис. 1. Оно состоит из корпуса 1, гидроцилиндра 2, клапанного блока 3, двух полиуретановых втулок 4 и 5.

После доставки данного устройства в скважину до места предполагаемого гидроразрыва рабочая

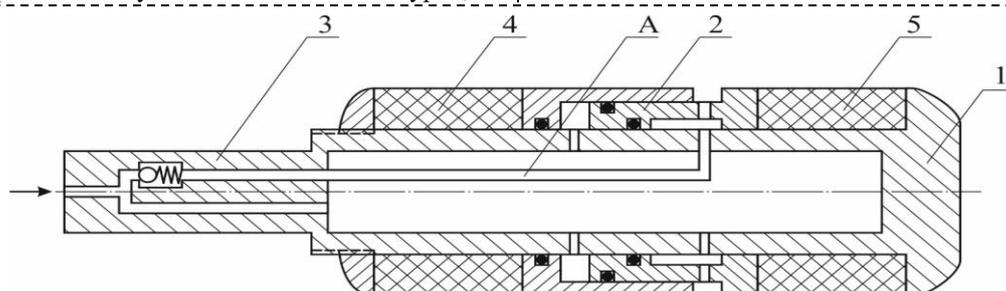


Рис. 1. Схема полиуретанового уравновешенного герметизирующего устройства

Fig. 1. Diagram of a polyurethane balanced sealing device

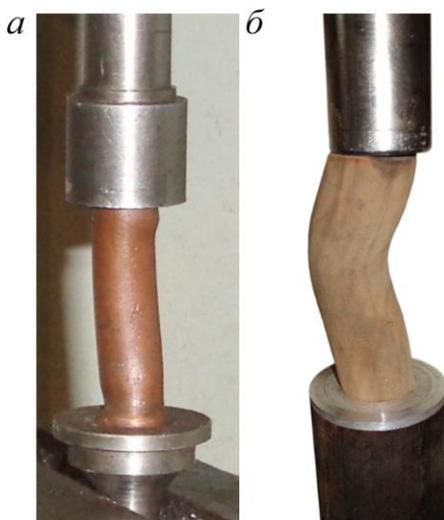


Рис. 2. Потеря устойчивости элементов при осевом сжатии: а – металлическая оболочка; б – полиуретановая

Fig. 2. Loss of stability of elements under axial compression: a-metal shell; b – polyurethane shell

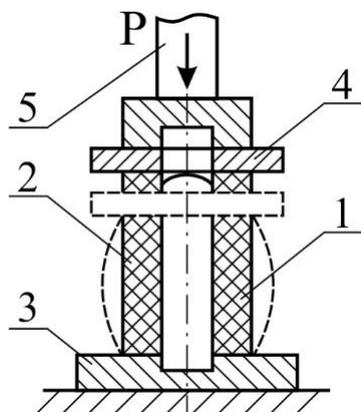


Рис. 3. Схема лабораторной установки для исследования уплотняющих элементов: 1 – цилиндрический полиуретановый элемент; 2 – центрирующий стержень; 3 – упорная плита; 4 – шайба; 5 – пуансон

Fig. 3. Diagram of the laboratory installation for the study of sealing elements: 1 – cylindrical polyurethane element; 2 – centering rod; 3 – thrust plate; 4 – washer; 5 – punch

жидкость по внутренним каналам подается в клапанный блок 3, который вначале направляет поток рабочей жидкости от насоса в гидроцилиндр 2. Последний, раздвигаясь, сжимает полиуретановые втулки 4 и 5, которые, увеличиваясь по внешнему диаметру, прижимаются к стенкам скважины, обеспечивая герметизацию участка между указанными уплотнениями. Затем по линии А жидкость поступает в загерметизированный участок под давлением, требуемым для гидроразрыва вмещающего массива. Однако практическое применение устройства в шахтных экспериментах выявило некоторую неопределенность в стабильности работы устройства, например, потерю герметизации и «заклинивание» пакера (в среднем в 1-2 случаях из 15 проводимых гидроразрывов), что обусловило необходимость

проведения дополнительных лабораторных и теоретических исследований работы полиуретановых втулок на осевое сжатие для определения оптимальных граничных условий применения устройства.

В представленной схеме полиуретановые втулки 4, 5 находятся в условиях осевого сжатия и проведенные лабораторные исследования показали, что потеря устойчивости таких элементов происходит аналогично металлическим тонким оболочкам цилиндрической формы [3]. На рис. 2 приведен пример потери устойчивости цилиндрической металлической оболочки и полиуретанового уплотнения.

Эта аналогия позволяет применить известные расчеты сопротивления материалов на устойчивость для центрально сжатых стержней к решению задачи повышения эффективности герметизации скважин пакерами с уплотняющими элементами, выполненными из полиуретана при проведении гидроразрывов.

Исследования режимов работы полиуретановых уплотняющих элементов производились на стенде, схема которого представлена на рис. 3.

Для расчета полиуретановых уплотнительных элементов используем известные теории расчета на устойчивость тонкостенных цилиндров, находящихся под действием сжимающей осевой нагрузки [10].

$$q_{кр} = 2 \sqrt{\frac{D \cdot E \cdot \delta}{R^2}} = \frac{E \cdot \delta^2}{R} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \quad (1)$$

где  $q_{кр}$  – равномерно распределенная нагрузка, действующая на торец образца от силы сжатия  $R_{кр}$ ;  $E$  – модуль продольной упругости;  $\delta$  – толщина стенки образца;  $R$  – усредненный радиус образца;  $\mu$  – коэффициент Пуассона. Тогда:

$$\sigma_{кр} = \frac{q_{кр}}{\delta} = \frac{E \cdot \delta}{R \cdot \sqrt{3(1-\mu^2)}} \quad (2)$$

$$R_{кр} = q_{кр} \cdot S' = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma_{кр} \cdot \delta = \frac{2 \cdot \pi \cdot E \cdot \delta^2}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \quad (3)$$

где  $S'$  – площадь торца образца.

В выражениях (2) и (3) неопределенными значениями являются коэффициенты для полиуретанов – это модуль продольной упругости  $E$  и коэффициент Пуассона  $\mu$ .

Коэффициент Пуассона  $\mu = \varepsilon'/\varepsilon$ , где  $\varepsilon'$  – поперечная деформация,  $\varepsilon$  – продольная деформация, был определен экспериментально на нескольких образцах из полиуретана по измерению величин:  $\varepsilon' = \Delta d/d$ ;  $\varepsilon = \Delta L/L$ , где  $d$  и  $L$  – соответственно начальный диаметр и длина образца, а  $\Delta d$  и  $\Delta L$  – их изменение в процессе нагружения.

Среднее значение коэффициента Пуассона для полиуретана – 0,47, для образцов со следующими начальными геометрическими размерами:  $d = 72$  мм;  $L = 200$  мм;  $\delta = 18$  мм.

Если модуль продольной упругости для металлов считается постоянным на значительном интервале диаграммы растяжения – сжатия, на котором действует закон Гука, то для полиуретана этот интервал значительно меньше.

В работе [11] установлено, что геометрические размеры полиуретанов значительно влияют на жесткость образцов. Показатель зависимости жесткости полиуретана от размеров образца называется «фактором формы» –  $\Phi$ . Для образцов в виде полого цилиндра данный показатель определяется по выражению:

$$\Phi = \frac{D - d}{4H} \quad (4)$$

где  $d$  – внутренний диаметр полого цилиндра.

В лабораторных условиях был определен коэффициент деформации  $K_{деф}$  для полиуретана в виде следующей зависимости:

$$K_{деф} = 1 + \frac{ShA^{1,17}}{1000} \quad (5)$$

где  $ShA$  – твердость по Шору по шкале А; а модуль Юнга  $E_{эл}$  был определен как зависимость от  $\Phi$ :

$$E_{эл} = E_0 \cdot k_{тр} \cdot K_{деф} \cdot (0,8 + \Phi). \quad (6)$$

С учетом неподвижности торцов образцов во время осевого сжатия (рис. 3) принимаем  $k_{mp} = 1$ , тогда:

$$E_{эл} = E_0 \cdot K_{деф} \cdot (0,8 + \Phi). \quad (7)$$

Выполним теоретический расчет  $P_{кр}^3$  полиуретанового образца полой цилиндрической формы, воспользовавшись основными зависимостями, приведенными выше. Подставим (7) в (3) и определим  $P_{кр}^3$  для полиуретанового образца (рис. 3) со следующими геометрическими размерами:  $d = 72$  мм,  $L = 200$  мм,  $\delta = 18$  мм. Сравним теоретически полученные результаты с показателями, полученными в ходе испытания лабораторных образцов.

Лабораторные эксперименты включали два варианта осевого нагружения образцов: первый – на центрирующем стержне (рис. 3); второй – без направляющего стержня. Результаты исследований представлены в таблице.

Из сравнения полученных показателей, приведенных в Таблице 1, видно, что нагружение образца в условиях лаборатории превышает теоретическое – расчетное примерно на 20% при условии наличия центрирующего стержня 2 (рис. 2). Без стержня отклонение по нагрузке не превышает 7%.

Таким образом, наличие центрирующего стержня при сжатии полого цилиндрического образца повышает его устойчивость в 1,2 раза. Форма потери устойчивости не меняется в обоих случаях.

На основании полученных в ходе проведения лабораторных исследований результатов расчетная формула определения критической сжимающей силы примет вид

$$P_{кр}^{ц.с.} = \frac{2 \cdot \pi \cdot E \cdot \delta^2 \cdot k_{ст}}{\sqrt{3(1 - \mu^2)}} \quad (8)$$

Выводы:

1. Объем тела полиуретанового образца является постоянной величиной при осевом нагружении, меняя только внешнюю форму.
2. Цилиндрические образцы из полиуретана не теряют устойчивость от осевого сжатия, если отношение  $L/d \leq 3$  и  $d/\delta \leq 4,5$ , где  $L$  – длина образца;  $d$  – внешний диаметр;  $\delta$  – толщина стенки цилиндра.
3. В пакерных устройствах, когда от силы осевого сжатия полиуретановый образец теряет устойчивость, он, бесформенно деформируясь, неравномерно прижимается к поверхности скважины, что не обеспечивает полноценную герметизацию и способствует его заклиниванию в скважине.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A.J. Mansure, «Polyurethane Grouting Geothermal Lost Circulation Zones», presented at the IADC/SPE Drilling Conference, Feb. 2002, doi: 10.2118/74556-MS.
2. Y. X. L. Jinliang, «Research Progress in Polyurethane Material for Coal Mine Reinforcement», Polyurethane Industry, vol. 5, 2011.
3. L. Wanjie and S. Yinghua, «Study on properties of polyurethane as seal material under coal mine», Coal Conversion, vol. 26, no. 4, pp. 76-78, 2003.
4. Y.M. Lekontsev and P.V. Sazhin, «Directional hydraulic fracturing in difficult caving roof control and coal degassing», Journal of mining science, vol. 50, no. 5, pp. 914-917, 2014.
5. O.V. Tailakov, E.A. Utkaeв, and A.N. Kormin, «Intensification of gas recovery from coal seams applying the method of hydrodynamic impact in horizontal boreholes», IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 377, p. 012047, Nov. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/377/1/012047.
6. Y. Lekontsev, O.A. Temiryayeva, and P.V. Sazhin, «Laboratory tests of the packer sealing elements», IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 262, p. 012040, Jun. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/262/1/012040.
7. V.I. Klishin, G.Y. Opruk, and A.L. Tatsienko, «Technology and means of a coal seam interval hydraulic fracturing for the seam degassing intensification», IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 53, p. 012019, Feb. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/53/1/012019.

Таблица. Результаты исследования испытания образцов на устойчивость.  
Table. Findings of samples stability testing study.

Теоретическое (расчетное значение) критической сжимающей силы			Примечание
Твердость по Шору	Начальный модуль упругости $E_0$ , МПа	Допустимое значение осевой нагрузки $P_{кр}^3$ , кН	
79	21	3,7	
Данные лабораторных исследований			
79	21	3,96	
79	21	4,5	С центрирующим стержнем

8. Леконцев Ю.М., Сажин П.В., Темиряева О.А., Хорешок А.А., Ушаков С.Ю. Исследование режимов работы уравновешенного герметизатора // ФТПРПИ. – № 5. – 2013. – с. 91-98.
9. Патент РФ № 236779. Устройство для гидроразрыва пород в скважине / Ю.М. Леконцев, П.В. Сажин // Опубл. в Бюл. № 26 – 2009.
10. Бояринов С.В. Основы строительной механики машин // М., «Машиностроение». – 1973. – 456 с.
11. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопrotивление материалов // М., «Высшая школа». – 2004. – 560 с.
12. Яковлев С.Н. Расчет полиуретановых деталей, работающих на сжатие при статических нагрузках // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – № 1(190). – 2014. – с. 137 – 142.
13. P. Liu, Y. Jiang, and B. Fu, «A novel approach to characterize gas flow behaviors and air leakage mechanisms in fracture-matrix coal around in-seam drainage borehole», Journal of Natural Gas Science and Engineering, vol. 77, p. 103243, May 2020, doi: 10.1016/j.jngse.2020.103243.
14. L.-Z. Wu, B. Huang, Y. Zhao Li, B. Xie, and R. Lin, «Analysis of the Propagation Path for Hydraulic fracture Intersecting Natural Fracture», in Energy, Environmental & Sustainable Ecosystem Development, 0 vols., WORLD SCIENTIFIC, 2015.
15. W. Yang, C. Lu, G. Si, B. Lin, and X. Jiao, «Coal and gas outburst control using uniform hydraulic fracturing by distress blasting and water-driven gas release», Journal of Natural Gas Science and Engineering, vol. 79, p. 103360, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jngse.2020.103360.
16. A. Gerami, R.T. Armstrong, B. Johnston, M.E. Warkiani, N. Mosavat, and P. Mostaghimi, «Coal-on-a-Chip: Visualizing Flow in Coal Fractures», Energy Fuels, vol. 31, no. 10, pp. 10393-10403, Oct. 2017, doi: 10.1021/acs.energyfuels.7b01046.
17. N. Li, L. Fang, W. Sun, X. Zhang, and D. Chen, «Evaluation of Borehole Hydraulic Fracturing in Coal Seam Using the Microseismic Monitoring Method», Rock Mech Rock Eng, vol. 54, no. 2, pp. 607-625, Feb. 2021, doi: 10.1007/s00603-020-02297-8.
18. J. Wu, H. Yan, J. Wang, Y. Wu, and C. Zhou, «Flame retardant polyurethane elastomer nanocomposite applied to coal mines as air-leak sealant», Journal of Applied Polymer Science, vol. 129, no. 6, pp. 3390-3395, 2013, doi: https://doi.org/10.1002/app.38946.
19. A.G. Fareo and D.P. Mason, «Group invariant solution for a pre-existing fracture driven by a power-law fluid in permeable rock», Int. J. Mod. Phys. B, vol. 30, no. 28n29, p. 1640010, Jun. 2016, doi: 10.1142/S0217979216400105.
20. Q. Zhu, Y. Feng, M. Cai, J. Liu, and H. Wang, «Interpretation of the extent of hydraulic fracturing for rockburst prevention using microseismic monitoring data», Journal of Natural Gas Science and Engineering, vol. 38, pp. 107-119, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jngse.2016.12.034.
21. J. Xu, C. Zhai, and L. Qin, «Mechanism and application of pulse hydraulic fracturing in improving drainage of coalbed methane», Journal of Natural Gas Science and Engineering, vol. 40, pp. 79-90, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jngse.2017.02.012.
22. K. Si et al., «Numerical Simulation on Mesoscale Mechanism of Seepage in Coal Fractures by Fluid-Solid Coupling Method», Geofluids, vol. 2021, p. e5562149, Mar. 2021, doi: 10.1155/2021/5562149.
23. J. Shen, B. Ren, W. Liu, C. Gao, Y. Hu, and Q. Cao, «Optimization of Exothermic, Foaming, and Mechanical Properties of Modified Polyurethane as Filling Material for Goaf Sealing Wall», Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2020, p. e2849609, Dec. 2020, doi: 10.1155/2020/2849609.
24. Y.X.L. Jinliang, «Research Progress in Polyurethane Material for Coal Mine Reinforcement», Polyurethane Industry, vol. 5, 2011.

**Yuri M. Lekontsev**<sup>1</sup>, C. Sc. in Engineering, **Alexey A. Khoreshok**<sup>2</sup>, Dr. Sc. in Engineering, Professor, **Pavel V. Sazhin**<sup>1\*</sup>, C. Sc. in Engineering, **Yuri B. Mezentsev**<sup>3</sup>, Chief Miner of PMH-Ugol

<sup>1</sup>N. A. Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54 Krasny Prospekt, 630091, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>T.F. Gobachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennaya str., 650000, Kemerovo, Russia

<sup>3</sup>PMH-Ugol, Stakhanovskaya-1 str., 650021, Kemerovo, Russia

\*E-mail: pavel301080@mail.ru

## INVESTIGATION AND CALCULATION OF POLYURETHANE PACKER ELEMENTS FOR AXIAL COMPRESSION

**Abstract:** The design of a device developed and patented at the N. A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, which allows hydraulic fracturing along the entire length of the well at intervals provided for by technological calculations, is presented. The process of operation of the sealing elements of the balanced sealer under conditions of axial compression is described on the example of a device developed at the N. A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. A laboratory stand for the study of samples of bushings made of polyurethane is schematically presented. According to the results of laboratory studies, comparative types of deformations of thin-wall metal cylinders and polyurethane bushings under the action of static axial loading are shown. Theoretical calculations of changes in the geometric dimensions of the samples in the form of hollow cylinders made of elastomers in the

perpendicular direction to the applied force are presented. The criteria for calculating the geometric parameters of sealing bushings for packer devices and the optimal force action, which eliminates the loss of their stability during axial compression, and, consequently, the exclusion of their "jamming" in the working well, are determined. A theoretical calculation of the maximum axial loading force is performed on the example of a polyurethane sample in the form of a hollow cylindrical sleeve with geometric dimensions:  $d = 72$  mm,  $L = 200$  mm and  $\delta = 18$  mm, and a comparison is made with bench tests of the samples.

**Keywords:** balanced sealer, sealing element, packer, interval hydraulic fracturing.

**Article info:** received January 26, 2021

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-4-3-8

#### REFERENCES

1. A. J. Mansure, «Polyurethane Grouting Geothermal Lost Circulation Zones», presented at the IADC/SPE Drilling Conference, Feb. 2002, doi: 10.2118/74556-MS.
2. Y.X.L. Jinliang, «Research Progress in Polyurethane Material for Coal Mine Reinforcement», Polyurethane Industry, vol. 5, 2011.
3. L. Wanjie and S. Yinghua, «Study on properties of polyurethane as seal material under coal mine», Coal Conversion, vol. 26, no. 4, pp. 76-78, 2003.
4. Y.M. Lekontsev and P.V. Sazhin, «Directional hydraulic fracturing in difficult caving roof control and coal degassing», Journal of mining science, vol. 50, no. 5, pp. 914-917, 2014.
5. O.V. Tailakov, E.A. Utkae, and A.N. Kormin, «Intensification of gas recovery from coal seams applying the method of hydrodynamic impact in horizontal boreholes», IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 377, p. 012047, Nov. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/377/1/012047.
6. Y. Lekontsev, O.A. Temiryayeva, and P.V. Sazhin, «Laboratory tests of the packer sealing elements», IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 262, p. 012040, Jun. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/262/1/012040.
7. V.I. Klishin, G.Y. Opruk, and A.L. Tatsienko, «Technology and means of a coal seam interval hydraulic fracturing for the seam degassing intensification», IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 53, p. 012019, Feb. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/53/1/012019.
8. Lekontsev, Yu.M., Sazhin, P.V., Temiryayeva, O.A., Horeshok, A.A., Ushakov, S.Yu., Investigation of the modes of operation of an equalized sealer, No. 5, 2013, pp. 91-98.
9. Russian Patent No. 236779. Device for hydraulic fracturing of rocks in a well / Yu. M. Lekontsev, P. V. Sazhin // Publ. in Byul. no. 26, 2009.
10. Boyarinov S.V. Osnovy stroitelnoy mekhaniki mashin. [Fundamentals of construction mechanics of machines], 1973, 456 p.
11. Alexandrov A.V., Potapov V. D., Derzhavin B. P. Resistance of materials, 2004, 560 p.
12. Yakovlev S. N. Calculation of polyurethane parts working on compression under static loads. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPSPU, № 1(190), 2014, pp. 137-142.

13. P. Liu, Y. Jiang, and B. Fu, «A novel approach to characterize gas flow behaviors and air leakage mechanisms in fracture-matrix coal around in-seam drainage borehole», Journal of Natural Gas Science and Engineering, vol. 77, p. 103243, May 2020, doi: 10.1016/j.jngse.2020.103243.
14. L.-Z. Wu, B. Huang, Y. Zhao Li, B. Xie, and R. Lin, «Analysis of the Propagation Path for Hydraulic fracture Intersecting Natural Fracture», in Energy, Environmental & Sustainable Ecosystem Development, 0 vols., WORLD SCIENTIFIC, 2015.
15. W. Yang, C.Lu, G. Si, B. Lin, and X. Jiao, «Coal and gas outburst control using uniform hydraulic fracturing by destress blasting and water-driven gas release», Journal of Natural Gas Science and Engineering, vol. 79, p. 103360, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jngse.2020.103360.
16. A. Gerami, R.T. Armstrong, B. Johnston, M.E. Warkiani, N. Mosavat, and P. Mostaghimi, «Coal-on-a-Chip: Visualizing Flow in Coal Fractures», Energy Fuels, vol. 31, no. 10, pp. 10393-10403, Oct. 2017, doi: 10.1021/acs.energyfuels.7b01046.
17. N. Li, L. Fang, W. Sun, X. Zhang, and D. Chen, «Evaluation of Borehole Hydraulic Fracturing in Coal Seam Using the Microseismic Monitoring Method», Rock Mech Rock Eng, vol. 54, no. 2, pp. 607-625, Feb. 2021, doi: 10.1007/s00603-020-02297-8.
18. J. Wu, H. Yan, J. Wang, Y. Wu, and C. Zhou, «Flame retardant polyurethane elastomer nanocomposite applied to coal mines as air-leak sealant», Journal of Applied Polymer Science, vol. 129, no. 6, pp. 3390-3395, 2013, doi: https://doi.org/10.1002/app.38946.
19. A.G. Fareo and D.P. Mason, «Group invariant solution for a pre-existing fracture driven by a power-law fluid in permeable rock», Int. J. Mod. Phys. B, vol. 30, no. 28n29, p. 1640010, Jun. 2016, doi: 10.1142/S0217979216400105.
20. Q. Zhu, Y. Feng, M. Cai, J. Liu, and H. Wang, «Interpretation of the extent of hydraulic fracturing for rockburst prevention using microseismic monitoring data», Journal of Natural Gas Science and Engineering, vol. 38, pp. 107-119, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jngse.2016.12.034.
21. J. Xu, C. Zhai, and L. Qin, «Mechanism and application of pulse hydraulic fracturing in improving drainage of coalbed methane», Journal of Natural Gas Science and Engineering, vol. 40, pp. 79-90, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jngse.2017.02.012.

22. K. Si et al., «Numerical Simulation on Mesoscale Mechanism of Seepage in Coal Fractures by Fluid-Solid Coupling Method», *Geofluids*, vol. 2021, p. e5562149, Mar. 2021, doi: 10.1155/2021/5562149.

23. J. Shen, B. Ren, W. Liu, C. Gao, Y. Hu, and Q. Cao, «Optimization of Exothermic, Foaming, and

Mechanical Properties of Modified Polyurethane as Filling Material for Goaf Sealing Wall», *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, p. e2849609, Dec. 2020, doi: 10.1155/2020/2849609.

24. Y.X.L. Jinliang, «Research Progress in Polyurethane Material for Coal Mine Reinforcement», *Polyurethane Industry*, vol. 5, 2011.

#### **Библиографическое описание статьи**

Леконцев Ю.М., Хорешок А.А., Сажин П.В., Мезенцев Ю.Б. Исследование и расчет полиуретановых элементов пакеров на осевое сжатие // Горное оборудование и электромеханика – 2021. – № 4 (156). – С. 3-8.

#### **Reference to article**

Lekontsev Yu.,M., Khoreshok A.A., Sazhin P.V., Mezentsev Yu.B. Investigation and calculation of polyurethane packer elements for axial compression. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2021, no.4 (156), pp. 3-8.