

# Испытание полиуретановых уплотнений для пакерных устройств\*

## Testing of polyurethane seals for packer devices

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-115-82-85>

### ЛЕКОНЦЕВ Ю.М.

Канд. техн. наук, старший научный  
сотрудник Института угля ФИЦ УУХ СО РАН,  
650065, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: kvi194917@mail.ru

### САЖИН П.В.

Канд. техн. наук, старший научный  
сотрудник Института угля ФИЦ УУХ СО РАН,  
650065, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: pavel301080@mail.ru



В статье представлены результаты анализа шахтных наблюдений работы уравновешенных герметизаторов с полиуретановыми уплотнительными элементами и результаты стендовых исследований последних, выполненных в виде полых цилиндров, на устойчивость при осевом сжатии. На основании этих испытаний приведены теоретические расчеты деформационных характеристик полиуретановых уплотнений трубчато – цилиндрической формы, насаженных с натягом на стальной стержень и находящихся в условиях одноосного сжатия.

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

**Для цитирования:** Леконцев Ю.М., Сажин П.В. Испытание полиуретановых уплотнений для пакерных устройств // Уголь. 2024;(115): 82-85. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-115-82-85.

### Abstract

The paper presents the results of analysing mine observations of the balanced packer operation with polyurethane sealing elements and the results of bench testing of these sealing elements made as hollow cylinders for their stability under axial compression. Theoretical calculations of the deformation characteristics of tubular cylindrical polyurethane seals force-fitted on a steel rod and subjected to uniaxial compression are given on the basis of these tests.

### Keywords

Balanced seal, sealing element, packer, hydraulic fracturing.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 № 1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1191).

### Acknowledgements

The research was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the 'Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life' Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle, approved by Order No. 1144-p of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022 (Agreement No. 075-15-2022-1191).

### For citation

Lekontsev Yu.M., Sazhin P.V. Testing of polyurethane seals for packer devices. *Ugol'*. 2024;(115):82-85. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-115-82-85.

### ВВЕДЕНИЕ

Полиуретаны нашли широкое применение во многих отраслях промышленности, так как обладают высокой способностью к упругим деформациям и являются безальтернативными изделиями во многих конструкциях современных механизмов и машин. Известно применение полиуретановых уплотнительных элементов и в конструкциях пакерных устройств (уравновешенные герметизаторы), предназначенных для герметизации участков скважин и шпуров, пройденных в породном или угольном массивах для проведения поинтервальных гидроразрывов [1, 2, 3].

Схема одного из применяемых на угольных шахтах пакерного устройства представлена на *рис. 1*, которое 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 жидкость по внутренним каналам буровых или досылочных штанг поступает в полость А, из которой первоначально ее поток направляется от насосной установки 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 из полости А жидкость, после открытия подпорного клапана 3, поступает в загерметизированный участок (через канал Б) под давлением, требуемым для гидроразрыва вмещающего массива.

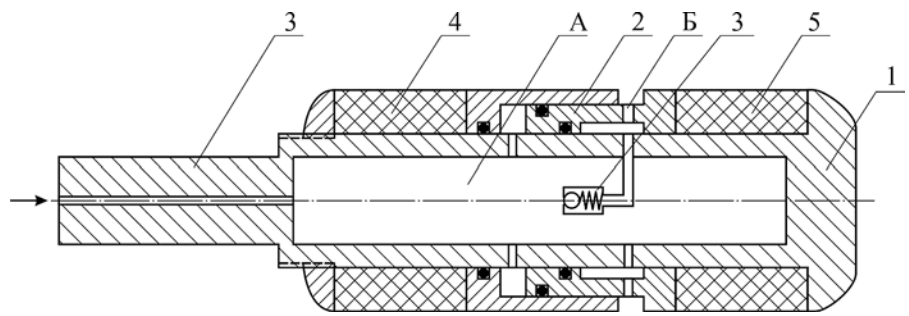


Рис. 1. Схема полиуретанового уравновешенного герметизирующего устройства  
Fig. 1. A schematic diagram of the polyurethane balanced sealing device



Рис. 2. Потеря устойчивости элементов при осевом сжатии: а – металлическая оболочка; б – полиуретановая  
Fig. 2. Loss of element stability under axial compression: a – a metal shell; b – a polyurethane shell

В ходе практического применения устройства в шахтных экспериментах выявили некоторую неопределенность в стабильности работы устройства, то есть 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 граничных условий эффективного применения уравновешенного герметизатора.

Сравнительные исследования цилиндрических образцов на осевое сжатие были проведены на лабораторном стенде-прессе двумя этапами. На первом этапе испытывались тонкостенные образцы, выполненные из металла, а на втором – из полиуретана. Эти исследования показали, что форма потери устойчивости таких

элементов аналогична [4]. На *рис. 2* приведен пример потери устойчивости цилиндрической металлической оболочки и полиуретанового образца.

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*.

В расчетах полиуретановых уплотнительных элементов была использована известная теория расчета на устойчивость тонкостенных металлических цилиндров, находящихся под действием сжимающей осевой нагрузки [5]:

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

где  $q_{кр}$  – равномерно распределенная нагрузка, действующая на торец образца от силы сжатия  $P_{кр}$ , Н/м;  $E$  – мо-

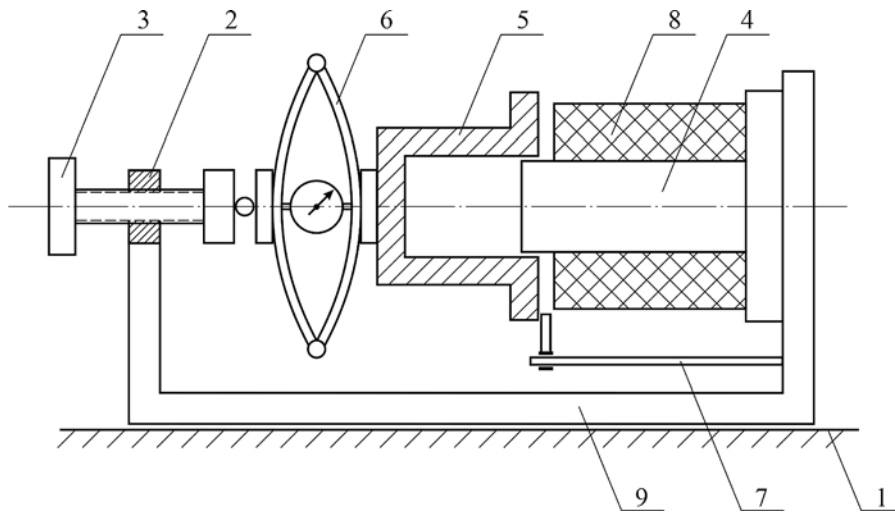


Рис. 3. Схема лабораторной установки для исследования уплотняющих элементов: 1 – цилиндрический полиуретановый элемент; 2 – центрирующий стержень; 3 – упорная плита; 4 – шайба; 5 – пуансон

Fig. 3. Layout of the laboratory setup to test the sealing elements: 1 – a cylindrical polyurethane element; 2 – the centring rod; 3 – a thrust plate; 4 – a washer; 5 – a punch

дуль продольной упругости, Па;  $\delta$  – толщина стенки образца, м;  $R$  – усредненный радиус образца, м;  $\mu$  – коэффициент Пуассона. Тогда:

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

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

где  $S'$  – площадь торца образца, м<sup>2</sup>.

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, м;  $\varepsilon$  – продольная деформация, м (были определены экспериментально на стенде (см. рис. 3) нагружением 10 экспериментальных образцов с различными геометрическими размерами из полиуретана по измерению величин:  $\varepsilon' = \Delta d/d$ ;  $\varepsilon = \Delta L/L$ , где  $d$  и  $L$  – соответственно, начальный диаметр, м и длина образца, м, а  $\Delta d$  и  $\Delta L$  – их изменение в процессе нагружения).

Среднее значение  $\mu_{пол} = 0,47$  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 [6] 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  $A$ ; а модуль Юнга  $E_{эл}$  был определен как зависимость от  $\Phi$ :

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

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

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

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 (см. рис. 3) с 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 (см. рис. 3); второй – без направляющего стержня. Результаты исследований представлены в таблице.

### Результаты исследования испытания образцов на устойчивость

Research results of the sample stability tests

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	Без центрирующего стержня
79	21	4,5	С центрирующим стержнем

Из сравнения полученных показателей (см. таблицу) видно, что нагружение образца в условиях лаборатории превышает теоретическое – расчетное примерно на 20% при условии наличия центрирующего стержня 2 (см. рис. 3). 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:

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

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объем тела полиуретанового образца является постоянной величиной при осевом нагружении, меняя только внешнюю форму. 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.

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 • References

1. Исследование режимов работы уравновешенного герметизатора / Ю.М. Леконцев, П.В. Сажин, О.А. Темиряева и др. // ФТПРПИ. 2013. № 5. С. 91-98.  
Lekontsev Yu.M., Sazhin P.V., Temiryayeva O.A., Khoreshok A.A., Ushakov S.Yu. Research into operation modes of the balanced sealing device. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2013;(5):91-98. (In Russ.).
2. Патент РФ № 236779. Устройство для гидроразрыва пород в скважине / Ю.М. Леконцев, П.В. Сажин. Опубл. в Бюл. 2009. № 26.
3. Технический комплекс для множественного локального гидроразрыва породного массива в необсаженных скважинах / С.В. Сердюков, Н.В. Дегтярева, А.В. Патутин и др. // ФТПРПИ. 2016. № 6. С. 180-186.  
Serdyukov S.V., Degtyareva N.V., Patutin A.V., Shilova T.V. A complex of technical equipment for multiple local hydraulic fracturing of the rock mass in uncased wells. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2016;(6):180-186. (In Russ.).
4. Бояринов С.В. Основы строительной механики машин. М.: Машиностроение. 1973. 456 с.
5. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа. 2004. 560 с.
6. Яковлев С.Н. Расчет полиуретановых деталей, работающих на сжатие при статических нагрузках // Научно-технические ведомости СПГПУ. 2014. № 1(190). С. 137-142.  
Yakovlev S.N. Calculation of polyurethane details which are working on shrinkage under static load. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta*. 2014;(190):137-142. (In Russ.).

### Authors Information

**Lekontsev Yu.M.** – PhD (Engineering), Senior Researcher, Institute of Coal, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650065, Russian Federation, e-mail: kvi194917@mail.ru

**Sazhin P.V.** – PhD (Engineering), Senior Researcher, Institute of Coal, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650065, Russian Federation, e-mail: pavel301080@mail.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.09.2024

Поступила после рецензирования: 21.10.2024

Принята к публикации: 31.10.2024

### Paper info

Received September 15, 2024

Reviewed October 21, 2024

Accepted October 31, 2024