

УДК 620.178.3

DOI 10.18698/0536-1044-2017-7-28-33

Исследование долговечности герметизирующих тонкостенных резиновых оболочек в гидроприводе поступательного перемещения*

В.П. Михайлов, Е.А. Деулин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

A Study of Longevity of Thin-Wall Rubber Sealing Elements in a Linear Hydraulic Drive

V.P. Mikhailov, E.A. Deulin

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: mikhailov@bmstu.ru, deulin@bmstu.ru



Рассмотрен гидропривод поступательного перемещения на основе тонкостенных резиновых оболочек (ТРО), диапазон линейного перемещения которого в 2 раза превышает длину оболочки. Эти гибкие оболочки являются также герметизирующими элементами гидропривода. Основное преимущество ТРО заключается в незначительной силе статического сопротивления, меньшей, чем у герметизирующего сильфона, что обеспечивает малую погрешность позиционирования. Однако ТРО является самым недолговечным элементом и определяет надежность привода в целом. Теоретические и экспериментальные данные позволили получить уравнения для расчета долговечности ТРО при работе в вакууме или при действии перепада давления. Уравнения могут быть также использованы для определения потока газа, вытекающего через трещину в ТРО при линейном движении штока для пневматического или вакуумного привода.

Ключевые слова: гидропривод поступательного перемещения, долговечность тонкостенной резиновой оболочки, упругое усталостное разрушение, динамика развития трещины



The article describes a linear hydraulic drive based on thin-wall rubber elements (TRE) whose range of linear displacement is two times larger than the length of the element. The TREs also serve as sealing elements of the hydraulic drive. The main advantage of the TREs is negligible static resistance force that is less than that of the sealing bellows, which provides high accuracy of positioning. However, the TRE is one of the least lasting elements, and it determines reliability of the drive in general. Using theoretical and experimental data, equations for calculating TRE longevity in a vacuum and under differential pressure were obtained. The equations could also be used to determine a gas flow leaking through a crack in the TRE when the piston rod of a pneumatic or vacuum drive moves linearly.

Keywords: linear hydraulic drive, longevity of a thin-wall rubber element, elastic fatigue fracture, dynamics of crack propagation

* Работа выполнена в рамках реализации базовой части Государственного задания № 9.8503.2017/БЧ Минобрнауки России в сфере научной деятельности.

В качестве герметизирующих элементов привода поступательного перемещения (например, привода для вакуумного оборудования, пневмо- или гидропривода и др.) применяют тонкостенные резиновые оболочки (ТРО) [1–5]. При этом силы статического сопротивления в ТРО меньше, чем в других типах герметизаторов (сильфонах, манжетах, диафрагмах), что позволяет снизить погрешность позиционирования привода. Кроме того, ТРО обеспечивает возможность поперечных и угловых смещений штока, что необходимо для многокоординатного позиционирования. Однако ТРО является самым недолговечным элементом и определяет надежность работы привода в целом.

Цель работы — исследование долговечности и динамики упругого усталостного разрушения ТРО.

На рис. 1 показан гидропривод поступательного перемещения, содержащий запатентованные мембранные узлы на основе ТРО [6, 7].

Такой гидропривод может работать как при атмосферном давлении, так и в вакуумной камере. Основными элементами гидропривода для работы в вакууме (рис. 1, б) являются каретка 1 с перемещаемым объектом, гидравлический насос 2, предохранительный клапан 3, магнитореологический (МР) распределитель 4, направляющие 5 и мембранные узлы 6 на основе ТРО. МР-распределитель состоит из четырех МР-дресселей, содержащих электромагнитные катушки К1–К4 и магнитопроводы с рабочими зазорами, через которые протекает

рабочая среда. В качестве рабочей среды в гидроприводе использована МР-суспензия на основе частиц карбонильного железа и вакуумного масла. Каретка с перемещаемым объектом, направляющие со штоком и мембранные узлы находятся в вакуумной камере, остальные элементы — в атмосфере. В случае полного закрытия МР-дресселей, рабочая среда перетекает в сливной бак через предохранительный клапан.

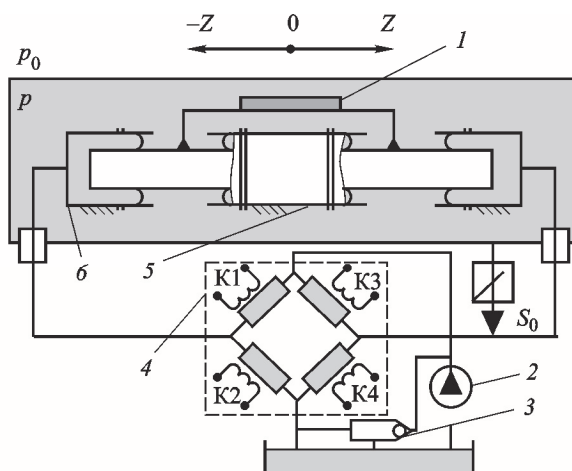
Гидропривод работает следующим образом. Рабочая среда с помощью насоса подается из сливного бака через МР-распределитель в мембранные узлы (см. рис. 1, б). Изменяя электрический ток в катушках К1–К4, можно регулировать напряженность магнитного поля в рабочих зазорах МР-дресселей и, соответственно, динамическую вязкость рабочей среды, протекающей через них. При изменении динамической вязкости рабочей среды в МР-дресселях меняется давление в мембранных узлах и осевая сила, действующая на шток. Поступательное перемещение по оси Z передается от мембранных узлов через шток к каретке, на которой закреплен объект.

Расчет напряженного состояния оболочки.

Герметизирующий элемент (ТРО) представляет собой оболочку цилиндрической формы с внутренним диаметром 20 мм и толщиной 0,3...0,4 мм из вакуумно-плотной резины ИРП-1345. Схема ТРО для расчета напряженного состояния приведена на рис. 2. Из теории надежности известно [8], что упругое усталостное разрушение герметизирующих элементов при-



а



б

Рис. 1. Внешний вид (а) и схема (б) гидропривода поступательного перемещения на основе ТРО: p_0 — атмосферное давление; p — давление в вакуумной камере; S_0 — скорость откачки камеры вакуумным насосом

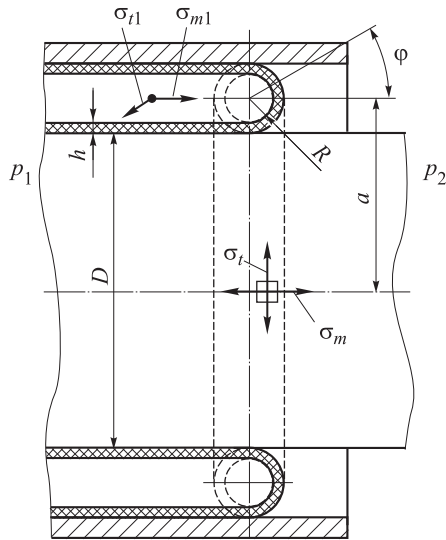


Рис. 2. Схема напряженного состояния ТРО:
 p_1 — абсолютное давление сжатого воздуха
 в рабочей камере; p_2 — атмосферное давление

вода (ТРО, сильфонов, волновых оболочек и др.) можно описать уравнением Велера:

$$\sigma_a + m \lg N_{cp} = c, \quad (1)$$

где σ_a — амплитуда действующих переменных напряжений; m, c — константы, зависящие от материала и вида нагружения; N_{cp} — средняя долговечность герметизирующего элемента в циклах.

Для определения амплитуды действующих переменных напряжений рассмотрим напряженное состояние в оболочке (см. рис. 2). Найдем напряжения, возникающие в цилиндрической части ТРО:

окружное напряжение

$$\sigma_{t1} = \frac{pD}{2h}, \quad (2)$$

меридиональное (осевое) напряжение и прогиб W оболочки

$$\sigma_{m1} = \frac{p[(D+2W)^2 - D^2]}{8Dh}; \quad (3)$$

$$W = \frac{pD^2}{2Eh} \left(1 - \frac{\mu}{2}\right),$$

где p — избыточное давление в рабочей камере ($p = p_1 - p_2$), $p = 0,1$ МПа; D — диаметр штока, $D = 20$ мм; h — толщина ТРО, $h = 0,4$ мм; E — модуль упругости резины, $E = 6$ МПа; μ — коэффициент Пуассона для резины, $\mu = 0,5$.

Максимальное напряжение σ_{t1} достигается при таком давлении p , когда прогиб ТРО равен

зазору между втулкой и штоком ($W = 3$ мм). Из формул (2) и (3) следует, что это давление равно $0,046$ МПа, а окружное напряжение $\sigma_{t1} = 1,15$ МПа. Окружное напряжение достигает этого значения и с ростом давления больше не увеличивается, так как оболочка не имеет возможности больше расширяться. Меридиональное (осевое) напряжение линейно увеличивается с повышением давления и при $p = 10^5$ Па имеет значение $\sigma_{m1} = 0,43$ МПа.

Определим напряжения в тороидальной части ТРО:

$$\sigma_t = \frac{pR}{2h}; \quad \sigma_m = \frac{pR}{2h} \frac{2a + R \sin \varphi}{a + R \sin \varphi},$$

где R — радиус изгиба оболочки; a — расстояние от оси штока до центра окружности изгиба ТРО; φ — текущее значение центрального угла в окружности изгиба.

Окружное напряжение в тороидальной части ТРО $\sigma_t = 0,21$ МПа, а меридиональное напряжение достигает максимального значения $\sigma_m = 0,43$ МПа при $\varphi = 90^\circ$. Для расчета долговечности оболочки в качестве σ_a принимаем максимальное из найденных действующих переменных напряжений ($\sigma_a = \sigma_{t1} = 1,15$ МПа).

Экспериментальные исследования долговечности ТРО. Для исследования долговечности ТРО создан стенд, схема которого представлена на рис. 3. Стенд содержит перемещаемый шток 1, две ТРО 2, автоматический датчик давления 3, ресивер 4, компрессор 5, клапаны 6, образцовый манометр 7 и рабочую камеру 8. Один конец ТРО с помощью резиновых уплот-

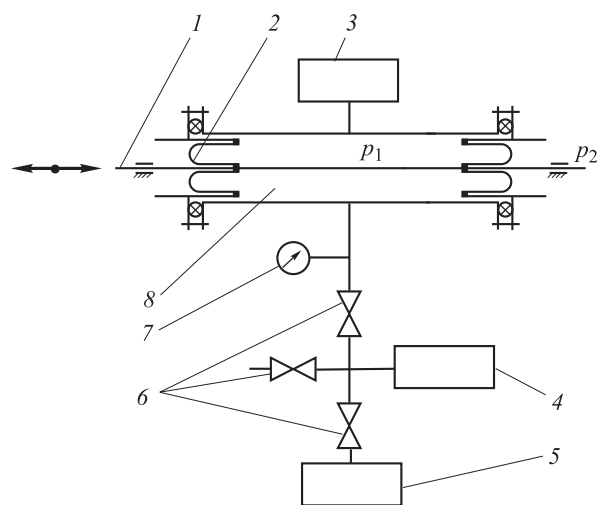


Рис. 3. Схема экспериментального стенда для исследования долговечности ТРО

нений герметично прикреплен к штоку, другой — к корпусу рабочей камеры. Шток, герметизированный двумя ТРО, совершает возвратно-поступательные линейные перемещения. Компрессор, ресивер и система клапанов обеспечивают наполнение рабочей камеры сжатым воздухом с избыточным давлением до 0,1 МПа. Давление сжатого воздуха измеряется с помощью автоматического датчика давления и образцового манометра.

Для построения модели упругого усталостного разрушения ТРО необходимо в уравнении (1) определить константу m . С этой целью проведены экспериментальные исследования долговечности N (количества циклов нагружения) ТРО при $\sigma_a = 1,15$ МПа, в результате которых получены следующие значения этого параметра, $N \cdot 10^{-6}$ циклов: 1,1; 1,3; 1,5; 2,5; 3,1; 3,6. Из полученных данных следует, что для нормального распределения с вероятностью 0,95 средняя долговечность $N_{cp} = (2,18 \pm 1,28) \cdot 10^6$ циклов.

При $\sigma_a = \sigma_b$, где σ_b — предел прочности резины на растяжение (для резины ИРП-1345 $\sigma_b = 30$ МПа), средняя долговечность $N_{cp} = 1$, т. е. ТРО разрушится при первом цикле нагружения. Таким образом, из уравнения (1) следует, что $c = \sigma_b = 30$ МПа. С учетом уравнения (1) и экспериментально определенной средней долговечности $N_{cp} = 2,18 \cdot 10^6$ циклов при $\sigma_a = 1,15$ МПа константа $m = 4,55$ МПа. Тогда, согласно уравнению (1), средняя долговечность ТРО будет зависеть от амплитуды действующих переменных напряжений и определяться уравнением

$$N_{cp} = 10^{\frac{\sigma_b - \sigma_a}{4,55}}$$

Анализ динамики упругого усталостного разрушения ТРО. После появления в оболочке

трещины проведен анализ динамики упругого усталостного разрушения ТРО и построены графики зависимости давления в рабочей камере от времени (рис. 4). Определено, что, если трещина прижата к штоку, давление в камере практически не падает. Когда трещина открыта, происходит утечка газа из рабочей камеры. При возвратно-поступательных перемещениях штока трещина периодически открывается, что приводит к соответствующему снижению давления в рабочей камере (время, через которое давление в камере уменьшается, совпадает с периодом возвратно-поступательных перемещений). Используя значения давлений в рабочей камере при полностью открытой трещине в начальный и конечный моменты времени, можно определить ее проводимость.

Поток натекания газа через трещину из рабочей камеры в атмосферу

$$Q_n = \frac{G_1 - G_t}{t},$$

где G_1 и G_t — количество газа в начальный и конечный моменты времени; t — время наблюдения ($t = 65$ с).

Количество газа в начальный G_1 и конечный G_t моменты времени можно определить как

$$G_1 = p_1 V; \quad G_t = p_t V,$$

где p_1 и p_t — абсолютное давление в рабочей камере в начальный и конечный моменты времени, $p_1 = 0,2$ МПа; V — объем камеры, $V = 3,31 \cdot 10^{-3}$ м³.

Проводимость трещины

$$U = \frac{Q}{p_{cp}} = \frac{G_1 - G_t}{t p_{cp}} = \frac{V(p_1 - p_t)}{t p_{cp}},$$

где p_{cp} — среднее абсолютное давление в трещине за время t , когда она открыта.

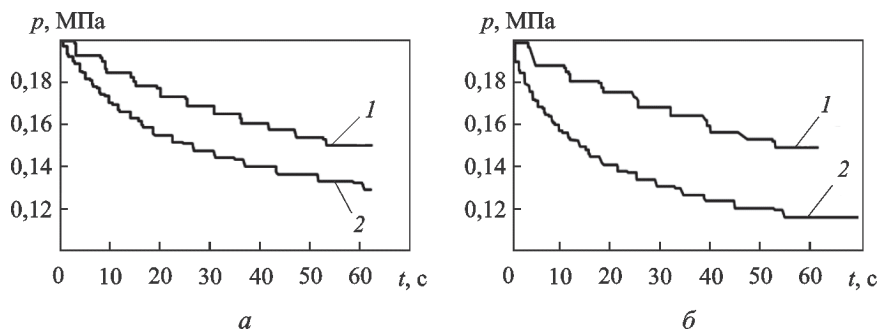


Рис. 4. Зависимости давления p в камере при возвратно-поступательных перемещениях штока с циклом 8 с (1) и при открытой трещине (2) от времени t : а — в момент появления трещины в ТРО; б — после 2 000 циклов возвратно-поступательных перемещений с трещиной в ТРО

**Результаты расчета
эквивалентного диаметра трещины в ТРО**

Количество циклов после появления трещины	p_b , МПа	Q_b , м ³ Па/с	U , м ³ /с	d , м
0	0,127	3,72	$2,84 \cdot 10^{-5}$	$8,64 \cdot 10^{-5}$
2 000	0,108	4,68	$3,69 \cdot 10^{-5}$	$9,3 \cdot 10^{-5}$

Рассчитав проводимость трещины в вязкостном режиме течения газа, оценим ее эквивалентный диаметр по формуле

$$d = \sqrt[4]{\frac{Uh}{1360 p_{cp}}},$$

где h — толщина ТРО, $h = 3,5 \cdot 10^{-4}$ м.

Таким образом, снимая через определенное количество циклов показания с датчика давления при открытой трещине (см. рис. 4, кри-

вые 2), можно проследить динамику ее развития. Результаты расчета эквивалентного диаметра трещины приведены в таблице.

Вывод

Экспериментальные исследования показали, что усталостное разрушение ТРО и развитие трещины происходят постепенно. Это обеспечивает ряд преимуществ при использовании ТРО в качестве герметизирующих элементов в вакуумном или другом технологическом оборудовании [9–15]: при обнаружении трещины необходимо отвести шток в такое положение, чтобы она была закрыта, после чего удалить обрабатываемые изделия из рабочей камеры; если требования к вакууму или чистой газовой среде невысоки, то ТРО позволяет отработать определенное количество циклов для того, чтобы закончить технологический процесс.

Литература

- [1] Деулин Е.А., ред. *Механика и физика точных вакуумных механизмов*. В 2 т. Т. 1. Владимир, Владимирский государственный университет, 2001. 176 с.
- [2] Деулин Е.А., ред. *Механика и физика точных вакуумных механизмов*. В 2 т. Т. 2. Москва, НПК «Интелвак», Вакууммаш, 2002. 152 с.
- [3] *Mechanics and Physics of Precise Vacuum Mechanisms. Fluid Mechanics and its Applications*. Ed. R. Moreau, vol. 91, Springer, 2010. 234 p.
- [4] Deulin E.A., Mikhailov V.P., Panfilov Y.V., Nevshupa R.A. *Vacuum mechanisms of nanoscale precision. Fluid Mechanics and its Applications*. 2010, vol. 91, pp. 137–166.
- [5] Борин Д.Ю., Михайлов В.П., Деулин Е.А., Зобов И.К. Прецизионный вакуумный модуль линейных перемещений с магнитореологическим управлением. *Вакуумная техника и технология*, 2007, т. 17, № 2, с. 141–146.
- [6] Анисимов В.В., Деулин Е.А., Михайлов В.П. *Прецизионный узел поступательного перемещения*. Пат. 1743797 РФ, 1992, бюл. № 24.
- [7] Анисимов В.В., Деулин Е.А., Докукин В.Г., Казаков А.Ф., Михайлов В.П., Проньков М.А., Хохлун А.Р. *Мембранный узел*. Пат. 2037702 РФ, 1995, бюл. № 17.
- [8] Вейбулл В. *Усталостные испытания и анализ их результатов*. Москва, Машиностроение, 1964. 275 с.
- [9] Крайнев А.Ф. *Механика машин. Фундаментальный словарь*. Москва, Машиностроение, 2000. 904 с.
- [10] Тимофеев Г.А., ред. *Теория механизмов и механика машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 654 с.
- [11] Гусев А.С. *Теоретические основы расчетов на сопротивление усталости*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 46 с.
- [12] Бобович Б.Б. *Неметаллические конструкционные материалы*. Москва, МГИУ, 2009. 383 с.
- [13] Потапова Л.Б., Ярцев В.П. *Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения?* Москва, Машиностроение-1, 2005. 244 с.
- [14] Водяник В.И. *Эластичные мембраны*. Москва, Машиностроение, 1974. 136 с.
- [15] Попов Д.Н. *Механика гидро- и пневмоприводов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 320 с.

References

- [1] *Mekhanika i fizika tochnykh vakuumnykh mekhanizmov* [Mechanics and physics of precise vacuum mechanisms]. Ed. Deulin E.A. Vladimir, Vladimir State University publ., 2001, vol. 1. 176 p.
- [2] *Mekhanika i fizika tochnykh vakuumnykh mekhanizmov* [Mechanics and physics of precise vacuum mechanisms]. Ed. Deulin E.A. Moscow, Intevak, Vakuummash publ., 2002, vol. 2. 152 p.
- [3] *Mechanics and Physics of Precise Vacuum Mechanisms. Fluid Mechanics and its Applications*. Ed. Moreau R., vol. 91, Springer, 2010. 234 p.
- [4] Deulin E.A., Mikhailov V.P., Panfilov Y.V., Nevshupa R.A. *Vacuum mechanisms of nanoscale precision. Fluid Mechanics and its Applications*. 2010, vol. 91, pp. 137–166
- [5] Borin D.Iu., Mikhailov V.P., Deulin E.A., Zobov I.K. *Pretsiionnyi vakuumnyi modul' lineinykh peremeshchenii s magnitoreologicheskim upravleniem* [Precision vacuum module linear motion with magneto-rheological control]. *Vakuumnaia tekhnika i tekhnologiya* [Vacuum technics and technology]. 2007, vol. 17, no. 2, pp. 141–146.
- [6] Anisimov V.V., Deulin E.A., Mikhailov V.P. *Pretsiionnyi uzel postupatel'nogo peremeshcheniia* [Precision component of the translational movement]. Patent RF no. 1743797. 1992.
- [7] Anisimov V.V., Deulin E.A., Dokukin V.G., Kazakov A.F., Mikhailov V.P., Pron'kov M.A., Khokhlun A.R. *Membrannyy uzel* [Membrane node]. Patent RF no. 2037702, 1995.
- [8] Veibull V. *Ustalostnye ispytaniia i analiz ikh rezul'tatov* [Fatigue testing and analysis of their results]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1964. 275 p.
- [9] Krainev A.F. *Mekhanika mashin. Fundamental'nyi slovar'* [Mechanics of machines. Fundamental dictionary]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2000. 904 p.
- [10] *Teoriia mekhanizmov i mekhanika mashin* [Theory of mechanisms and mechanics of machines]. Ed. Timofeev G.A. Moscow, Bauman Press, 2012. 654 p.
- [11] Gusev A.S. *Teoreticheskie osnovy raschetov na soprotivlenie ustalosti* [Theoretical basis for fatigue resistance calculations]. Moscow, Bauman Press, 2014. 46 p.
- [12] Bobovich B.B. *Nemetallicheskie konstruktsionnye materialy* [Non-metallic materials]. Moscow, MGIU publ., 2009. 383 p.
- [13] Potapova L.B., Iartsev V.P. *Mekhanika materialov pri slozhnom napriazhennom sostoianii. Kak prognoziruut predel'nye napriazheniia?* [Mechanics of materials under complex stress state. How to predict the yield stress?]. Moscow, Mashinostroenie-1 publ., 2005. 244 p.
- [14] Vodianik V.I. *Elastichnye membrany* [Elastic membrane]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1974. 136 p.
- [15] Popov D.N. *Mekhanika gidro- i pnevmoprivodov* [Mechanics, hydro- and pneumatic drives]. Moscow, Bauman Press, 2002. 320 p.

Статья поступила в редакцию 10.04.2017

Информация об авторах

МИХАЙЛОВ Валерий Павлович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: mikhailov@bmstu.ru).

ДЕУЛИН Евгений Алексеевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: deulin@bmstu.ru).

Information about the authors

MIKHAILOV Valeriy Pavlovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mikhailov@bmstu.ru).

DEULIN Evgeniy Alekseevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: deulin@bmstu.ru).