

Вакуумный ввод поступательного перемещения на основе тонкостенной резиновой оболочки

В.П. Михайлов, Е.А. Деулин
Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская, д. 5
e-mail: mikhailov@bmstu.ru

Вакуумный ввод поступательного перемещения герметизируется при помощи тонкостенной резиновой оболочки (ТРО). Длина перемещения вакуумного ввода в два раза превышает длину резиновой оболочки. Преимуществом ТРО является также незначительная сила сопротивления перемещению, меньшая, чем у сальффона, что позволяет сократить погрешность позиционирования. Однако ТРО является самым ненадежным элементом вакуумного ввода, что является основанием для проведения исследований её долговечности. Теория и экспериментальные результаты позволили получить уравнение для расчета долговечности ТРО при действии вакуумной среды или повышенной разности давлений. Рассчитан также поток газа через трещину в ТРО.

Vacuum linear motion feedthrough on base of thin wall rubber sealing element.
V.P.Mikhailov, E.A.Deulin. The vacuum linear motion feedthrough is based on thin wall rubber sealing element (TRE). The length of this movement is two times more than the rubber wall length. The main advantage of device is negligible resistance force that is less than the mentioned one in sealing bellows that leads to positioning error decreasing. Nevertheless, the thin wall rubber sealing element of the feedthrough is the main unreliable element which is the reason of this element longevity research. The theory and experimental results help to create equation for TRE longevity calculation.

Схемы вариантов вакуумных приводов поступательного перемещения на основе ТРО приведены в табл. 1. В этой таблице даны основные параметры привода: минимальное давление в вакуумной камере P , постоянная времени привода T , определяющая его быстродействие и погрешность позиционирования δ . В табл. 1 также перечислены достоинства и недостатки каждого варианта привода. На схеме 1 представлен вакуумный электромеханический 2-координатный привод на шаговых двигателях для установки электронной литографии [1]. Движение от шагового двигателя 1 через зубчатую передачу и передачу винт-гайка передается на нижнюю и верхнюю каретки координатного стола, расположенного в вакууме. Герметизация осуществляется при помощи ТРО 2. На схеме 2 показан вакуумный 1-координатный привод пневматического или гидравлического типа [1]. Привод содержит пневмо- или гидроцилиндр 1, каретку 2, герметизатор – ТРО 3, закрепленную на пневмо- или гидроцилиндре 1 и штоке 4 при помощи резиновых уплотнений 5 и металлических колец 6. Привод работает следующим образом. В пневмо- или гидроцилиндр 1 подается газ или жидкость, под действием которых возникает осевая сила, действующая на шток 4 и перемещающая каретку 2. При возвратно-поступательном движении штока 4 ТРО 3 перекачивается со штока 4 на пневмо- или гидроцилиндр 1 и обратно, создавая только упругие силы сопротивления. В этом случае полностью отсутствуют силы трения скольжения штока и пневмо- или гидроцилиндра, что позволяет обеспечить высокую точность и плавность перемещения. На схеме 3 приведен вакуумный 1-координатный магнитореологический (МР) привод с диапазоном перемещения по одной координате до 300 мм [1]. В качестве рабочей среды в модуле используется МР жидкость на основе микрочастиц карбонильного железа и вакуумного масла. Основными элементами привода являются МР-распределитель 4, насос 5 и тонкостенные резиновые оболочки (ТРО), герметизирующие направляющие 2 и два гидроцилиндра 3. МР распределитель 4 состоит из четырех МР дросселей, содержащих электромагнитные катушки К1-К4 и магнитопроводы с рабочими зазорами, через которые протекает рабочая среда. Перемещаемый объект 1, направляющие 2 со штоком и гидроцилиндры 3 находятся в вакуумной камере, остальные элементы в атмосфере. В случае полного закрытия МР дросселей, рабочая среда перетекает в сливной бак через предохранительный клапан 6. Привод работает следующим образом. Рабочая среда при

помощи насоса 5 подается из сливного бака через МР-распределитель в гидроцилиндры 3. Изменяя величину электрического тока в катушках К1-К4 можно регулировать напряженность магнитного поля в рабочих зазорах МР-дресселей и, соответственно, динамическую вязкость рабочей среды, протекающей через них. Таким образом, можно менять давление в гидроцилиндрах 3 и осевую силу, действующую на шток. Поступательное перемещение по оси Z передается от гидроцилиндров 3 через шток к каретке координатного стола, на которой закреплен перемещаемый объект 1. В процессе перемещения штока по оси Z в направляющих 2 ТРО перекачивается со штока на гидроцилиндры 3 и обратно, обеспечивая полную герметичность соединения. На схеме 4 приведен вакуумный пневматический или гидравлический 2-координатный привод с использованием ТРО 1, имеющих малые упругие силы сопротивления. Вакуумный 5-координатный привод (схема 5) позволяет перемещать объекты по одной длинноходовой координате Z (в диапазоне до 300 мм), двум координатам X и Y (в диапазоне до 200 мкм) и двум угловым координатам вокруг осей X и Y [1]. Привод содержит гидравлический насос 1, неподвижный корпус 2 и подвижный цилиндрический шток 3, герметизированный с двух сторон при помощи ТРО 4. Модуль представляет собой гидростатическую направляющую цилиндрического типа с четырьмя камерами высокого давления в корпусе 2, образующими опорный элемент направляющей. Для обеспечения устойчивости подвижного штока направляющая содержит два опорных элемента, расположенных вдоль оси Z. На входе камер высокого давления расположены МР-дрессели с электромагнитными катушками К1-К4, на выходе МР-дрессели с катушками К6, К7 (К5, К8 – не показаны). Модуль работает следующим образом. Рабочая среда – МР-жидкость подается при помощи насоса 1 из сливного бака через входные МР-дрессели с катушками К1-К4 в камеры высокого давления. Протекая через радиальные рабочие зазоры между подвижным цилиндрическим штоком и магнитопроводами выходных МР-дресселей с катушками К5-К8, рабочая жидкость попадает в сливной бак. Изменяя электрический ток в катушках МР-дресселей, можно регулировать давление в камерах модуля. При этом подвижный шток «всплывает» в корпусе 2 и может перемещаться вдоль осей X и Y, совершать поворот вокруг осей X и Y, а также при помощи дополнительного длинноходового привода (на схеме не показан) перемещаться вдоль оси Z. Герметизирующий элемент (ТРО) представляет собой оболочку цилиндрической формы с внутренним диаметром 20 мм и толщиной 0,3-0,4 мм из вакуумноплотной резины ИРП-1345. Схема ТРО для расчета напряженного состояния показана на рис. 1. Из теории надежности известно [3], что упругое усталостное разрушение герметизирующих элементов привода (ТРО, сильфонов, волновых оболочек и др.) может быть описано уравнением Велера:

$$\sigma_a + m \cdot \lg N = c, \quad (1)$$

где σ_a - амплитуда действующих переменных напряжений;
 N – средняя долговечность герметизирующего элемента в циклах;
 m, c – константы, зависящие от материала и вида нагружения.

Для определения амплитуды действующих переменных напряжений σ_a рассмотрим напряженное состояние в оболочке (см. рис. 1). Найдем напряжения, возникающие в цилиндрической части ТРО. Окружное напряжение определяется как:

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

меридиональное (осевое) напряжение и прогиб W оболочки:

$$\sigma_{m1} = \frac{p \cdot [(D + 2W)^2 - D^2]}{8Dh},$$
$$W = \frac{pD^2}{2Eh} \cdot \left(1 - \frac{\mu}{2}\right), \quad (3)$$

где p – избыточное давление в рабочей камере ($p=0.1$ 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_{tl} достигается при таком давлении p , когда прогиб ТРО равен зазору между втулкой и штоком ($W = 3$ мм). Из формулы 3 это давление равно $p = 0,046$ МПа, а окружное напряжение соответственно $\sigma_{tl} = 1,15$ МПа. Окружное напряжение достигает этого значения и с ростом давления больше не увеличивается, т.к. оболочка не имеет возможности больше расширяться. Меридиональное (осевое) напряжение линейно увеличиваются при росте давления и для $p = 10^5$ Па имеет значение $\sigma_{ml} = 0,43$ МПа. Определим напряжения в тороидальной части ТРО:

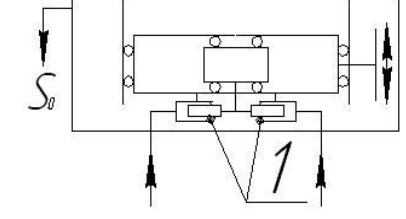
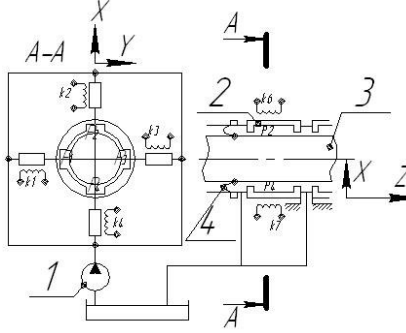
$$\sigma_t = \frac{pR}{2h},$$

$$\sigma_m = \frac{p \cdot R}{2h} \cdot \frac{2a + R \cdot \sin \varphi}{a + R \cdot \sin \varphi}, \quad (4)$$

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

Таблица 1. Схемы вариантов вакуумных приводов поступательного перемещения

Тип привода	№ схемы	Принципиальная схема	Основные параметры			Особенности привода
			Р, Па	Т, с	δ , мкм	
Электро-механический привод	1		10^{-5}	10^{-1}	0,5	2-координатный привод для микролитографии. Достоинство – обеспечение ВВ. Недостатки – длинная кинематическая цепь, невысокие точность и быстродействие.
Пневмо- или гидро-привод	2		10^{-5}	10^{-1} 10^{-3}	10^{-2}	1-координатный пневмо- или гидропривод для ВВ оборудования. Достоинства – обеспечение ВВ, короткая кинематическая цепь, высокие диапазон перемещений, точность и быстродействие. Недостаток – невысокая прочность ТРО.
	3		10^{-5}	10^{-3}	10^{-1}	1-координатный МР привод для ВВ оборудования. Достоинства – обеспечение ВВ, короткая кинематическая цепь, высокие точность и быстродействие. Недостаток – невысокая прочность ТРО.

4		10^{-5}	10^{-1}	10^{-1}	2-координатный пневмо- или гидропривод. Достоинства – обеспечение ВВ, короткая кинематическая цепь, высокие точность и быстродействие. Недостаток – невысокая прочность ТРО.
5		10^{-5}	10^{-3}	10^{-2}	5-координатный привод для ВВ оборудования. Достоинства – обеспечение ВВ, короткая кинематическая цепь, высокие диапазон перемещений, точность и быстродействие, возможность многокоординатных перемещений. Недостаток – невысокая прочность ТРО.

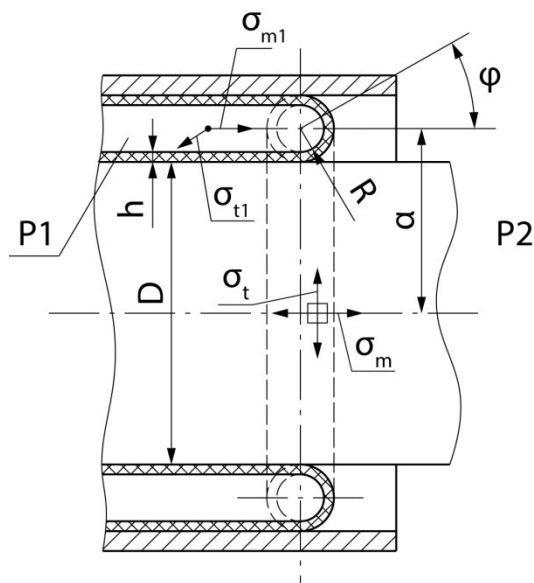


Рис. 1. Схема напряженного состояния ТРО.

Напряжение σ_t имеет значение $\sigma_t = 0,21$ МПа, а напряжение σ_m максимально при $\varphi=90^\circ$ и равно $\sigma_m=0,43$ МПа. Для расчета долговечности оболочки в качестве σ_a принимается максимальное из найденных действующих переменных напряжений (в нашем случае $\sigma_a = \sigma_{t1} = 1,15$ МПа). Для построения модели упругого усталостного разрушения ТРО необходимо в уравнении 1 Велера определить константу m . Для этого были проведены экспериментальные исследования долговечности шести образцов ТРО при давлении $P_1 = 0,2$ МПа, $P_2 = 0,1$ МПа.

Для нормального распределения средняя долговечность N с вероятностью 0,95 равна $N = (2,18 \pm 1,28) \cdot 10^6$ циклов. При $\sigma_a = \sigma_b$, где: σ_b – предел прочности резины на растяжение (для резины ИРП-1345 $\sigma_b=30$ МПа), средняя долговечность $N=1$, 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 определённой средней долговечности $N = 2,18 \cdot 10^6$ циклов при $\sigma_a=1,15$ МПа равна константа $m = 4,55$ МПа. Тогда средняя долговечность N работы ТРО согласно уравнению 1 будет зависеть от амплитуды действующих переменных напряжений и определяться следующим уравнением:

$$N = 10^{\frac{\sigma_b - \sigma_a}{4,55}} \quad (5)$$

После появления в оболочке трещины был проведен анализ динамики упругого усталостного разрушения ТРО и построены графики зависимости давления в рабочей камере от времени (рис. 2). Было 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 периодическому уменьшению 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 момент времени, мы можем определить ее проводимость.

Поток натекания газа через трещину из рабочей камеры в атмосферу:

$$Q_n = \frac{G_1 - G_t}{t}, \quad (6)$$

где $G_{1,t}$ – количество газа в начальный и конечный моменты времени;
 t – время наблюдения (в нашем эксперименте $t = 65$ с).

Количество газа в начальный и конечный момент времени можно определить, как:

$$G_{1,t} = P_{1,t} \cdot V, \quad (7)$$

где $P_{1,t}$ – абсолютное давление в рабочей камере в начальный и конечный моменты времени (в нашем случае $P_1 = 0,2$ МПа, P_t – определяется).

V – объем камеры ($V = 3,31 \cdot 10^{-3}$ м³).

Проводимость трещины равна:

$$U = \frac{Q_n}{P_{cp}} = \frac{G_1 - G_t}{t \cdot P_{cp}} = \frac{V(P_1 - P_t)}{t \cdot P_{cp}}, \quad (8)$$

где P_{cp} – среднее абсолютное давление в трещине за время t , когда трещина открыта.

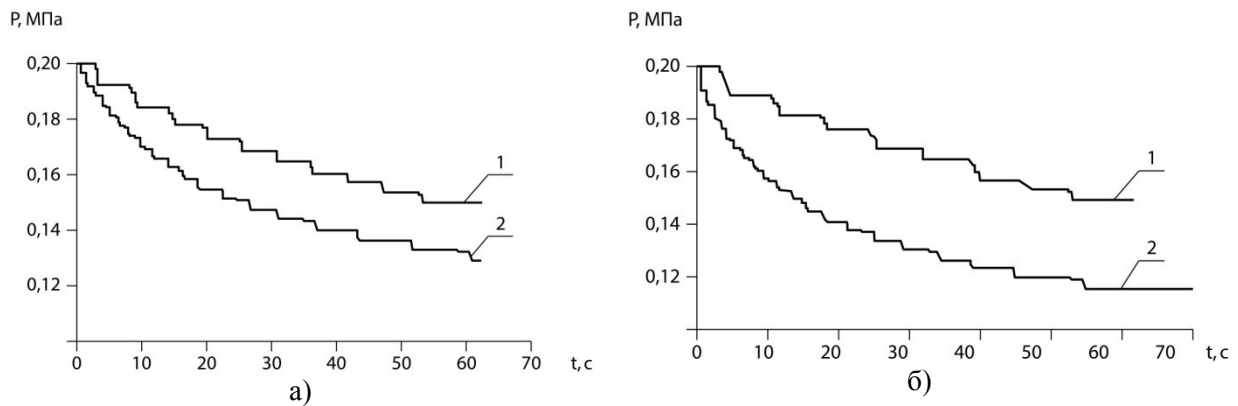


Рис. 2. Графики давления в камере: а) при появлении трещины в ТРО; б) после 2000 циклов возвратно-поступательных перемещений с трещиной в ТРО (1 – давление в камере при возвратно-поступательных перемещениях с циклом 8 с; 2 – давление в камере при открытой трещине).

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

$$d = \sqrt[4]{\frac{U \cdot h}{1360 \cdot P_{cp}}}, \quad (9)$$

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 (рис. 2, кривые 2) можно проследить динамику развития трещины. Результаты расчета эквивалентного диаметра трещины приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета эквивалентного диаметра трещины в ТРО

Кол-во циклов после появления трещины	P_t , МПа	Q_{it} , м ³ Па/с	U_t , м ³ /с	d , м
0	0,127	3,72	$2,84 \cdot 10^{-5}$	$8,64 \cdot 10^{-5}$
2000	0,108	4,68	$3,69 \cdot 10^{-5}$	$9,3 \cdot 10^{-5}$

Экспериментальные исследования показали, что усталостное разрушение ТРО и развитие трещины происходит постепенно, что дает ряд преимуществ при использовании ТРО в качестве герметизирующих элементов в вакуумном или другом технологическом оборудовании [1]: при обнаружении трещины необходимо отвести шток в такое положение, чтобы трещина была закрыта, после чего удалить 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.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации при выполнении НИР в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию №9.8503.2017/БЧ. Авторы выражают благодарность студенту МГТУ им. Н.Э. Баумана Яковлеву В.С. за помощь в подготовке этого доклада.

Литература

1. Mechanics and Physics of Precise Vacuum Mechanisms: FMIA Volume 91/ Series Editor R. Moreau, Springer, 2010.–234 p.
2. Патент № 2037702. Мембранный узел. Зарегистр. в Гос. реестре изобретений 19.06.1995 / В.В. Анисимов, Е.А. Деулин, В.Г. Докукин и др. - // Б.И. – 1995. - № 17.
3. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов. – М.: Машиностроение, 1964. – 275 с.