

УДК 539.3: 621.897

О.В. КРОПОТИН, канд. техн. наук; Ю.К. МАШКОВ, д-р техн. наук  
Омский государственный технический университет, Россия

С.В. ШИЛЬКО, канд. техн. наук  
Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель

## ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОЛЬЦЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКОВ ПО МОДИФИЦИРОВАННЫМ КРИТЕРИЯМ КАЧЕСТВА

*Для обеспечения заданных эксплуатационных характеристик контактных уплотнений с герметизаторами из полимерных композиционных материалов предложено использовать модифицированные критерии качества, учитывающие изменение геометрической формы и напряженно-деформированного состояния герметизатора в процессе изнашивания. В качестве примера выполнен анализ работоспособности уплотнительных колец из углепластиков, используемых в конструкции пневмогидроцилиндра.*

**Ключевые слова:** уплотнения, полимерные композиционные материалы, углепластики, герметичность, формоизменение, напряженно-деформированное состояние

**Введение.** При проектировании герметизирующих устройств (уплотнений) [1–5] используются критерии качества, не в полной мере определяющие требуемые показатели надежности и технического ресурса. Как правило, в эти критерии входят начальные значения параметров эксплуатации и деформационно-прочностных характеристик материалов или, в лучшем случае, учитываются временные зависимости отдельных параметров. Вместе с тем, известно, что формоизменение уплотнительных элементов вследствие ползучести, влагопоглощения, изнашивания и других факторов является основной причиной потери герметичности, а значит, снижения надежности и долговечности контактных уплотнений. С другой стороны, при высокой степени герметичности в начале эксплуатации зачастую не обеспечивается максимальный технический ресурс уплотнения.

Решить эту проблему, на наш взгляд, позволит разработка и использование (наряду с известными) критериев, одновременно учитывающих кинетические изменения параметров герметичности и напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов уплотнений при эксплуатации.

**Цель работы:** разработка критериев выбора полимерных композиционных материалов для кольцевых герметизирующих элементов, обеспечивающих заданные эксплуатационные характеристики контактных уплотнений.

**Объект и методика исследования.** Объект исследования — поршневое комбинированное герметизирующее устройство (ГУ) пневмогидроцилиндра, разделяющее полости, заполненные жидкостью и газом (рисунок 1). Эта конструкция, предварительно исследованная в работе [6], содержит уплотнительное кольцо круглого сечения с тонкой уплотняющей губкой, выполненное из полимерного композиционного материала (ПКМ) на основе по-

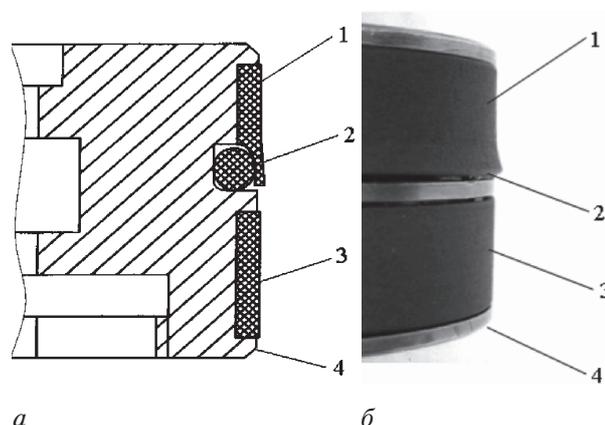


Рисунок 1 — Герметизирующее устройство пневмогидроцилиндра (а — осевое сечение, б — внешний вид):

1 — уплотнительное кольцо из ПКМ; 2 — резиновое кольцо; 3 — направляющее кольцо из ПКМ; 4 — корпус поршня

литетрафторэтилена (ПТФЭ), и силовой элемент в виде резинового кольца, поджимающего губку к поверхности цилиндра.

Условия работы пневмогидроцилиндра характеризуются периодами длительного хранения, во время которых эксплуатационные параметры нагружения элементов ГУ должны оставаться постоянными. Эффективность герметизирующего устройства определяется взаимосвязанными параметрами долговечности и герметичности, которые в значительной степени зависят от напряженно-деформированного состояния уплотнительных элементов. В свою очередь, НДС уплотнительных элементов определяется их конструкцией и свойствами используемых материалов.

Предварительные расчеты показали, что определяющую роль в сохранении вышеназванных эксплуатационных показателей играет формоизменение уплотнительных элементов устройства вследствие изнашивания, приводящее к перераспределению

контактных и объемных напряжений. Таким образом, выбор материала на основании значений степени герметичности уплотнения в начале эксплуатации не является оптимальным.

В зависимости от типа герметизирующего устройства, условий эксплуатации и показателей надежности логично использовать один из нижеприведенных критериев, учитывающих изменение уплотнительных элементов при трении:

- время достижения критического значения удельной утечки (переход в следующий класс негерметичности);
- время достижения критического расхода герметизируемой среды.

Предлагаемый подход использован нами для анализа функционирования и условий работы ГУ методом конечных элементов с помощью программного продукта ANSYS в рамках осесимметричной упругой модели. Для описания деформационного состояния элемента из резины использовали конечные элементы, для которых задается функция плотности энергии деформации Муни-Ривлина; ПКМ рассматривали как нелинейно-упругий материал, а контртела (поршень и цилиндр) считали абсолютно жесткими.

На каждом этапе нагружения решали задачу определения НДС уплотнительного и силового элементов, включая распределения контактного давления и градиента контактного давления по уплотняемой поверхности. Последний фактор, как известно, определяет объем перетечек, связанных с формированием жидкостной пленки, разделяющей поверхности уплотняющего элемента и контртела в условиях относительно возвратно-поступательного движения.

Заключение о возможности наступления параметрического отказа пневмогидроцилиндра в ходе эксплуатации производили на основании данных о техническом состоянии устройства. Верификацию расчетной модели производили сравнением результатов расчета с данными стендовых испытаний. Формоизменение уплотнительного элемента при трении моделировали по следующему алгоритму (рисунок 2):

- а) задание граничных условий и параметров нагружения;
- б) определение давления в контакте уплотнительного элемента и контртела при заданных условиях;
- в) расчет линейного износа и корректировка толщины уплотняющей губки пропорционально контактному давлению в данном сечении и числу циклов возвратно-поступательного движения цилиндра;
- г) задание граничных условий и параметров нагружения с учетом изменения геометрии сопряжения для моделирования последующих циклов возвратно-поступательного движения цилиндра.

Подобный подход использован в работе [4]. Расчет перетечек жидкости в полость, заполненную газом, проводили при возвратно-поступательном движении поршня и в статическом состоянии пневмогидроцилиндра с сохранением эксплуатационных параметров нагружения.

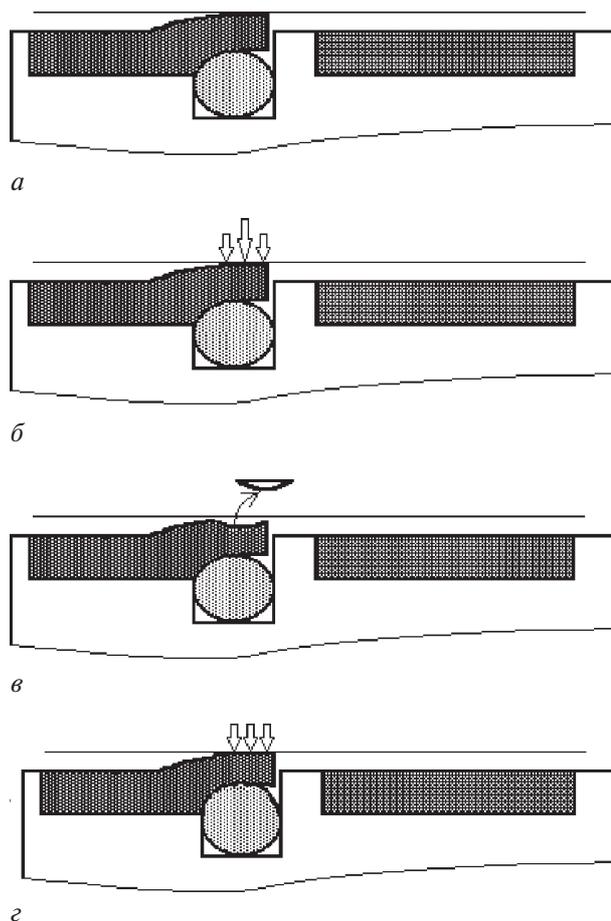


Рисунок 2 — Схема учета формоизменения уплотнительного элемента при трении

Методика выбора материалов для уплотнительного элемента ГУ включала анализ параметров контактного взаимодействия и НДС элементов ГУ, а также прогнозирование наработки уплотнения до достижения критического значения удельной утечки (переход в следующий класс негерметичности) с проверкой полученного значения по критерию достижения критического расхода герметизируемой жидкости. Для обоснования выбора ПКМ использовались физико-механические и триботехнические характеристики различных антифрикционных материалов [1, 7–9], в том числе: Ф4УВ6Г8М2 (84 % ПТФЭ, 6 % углеродного волокна, 8 % скрытокристаллического (образовавшегося при метаморфизме углей) графита, 2 % дисульфида молибдена) и Ф4Г10 (90 % ПТФЭ, 10 % скрытокристаллического графита).

Перетечки жидкости в условиях возвратно-поступательного движения цилиндра относительно поршня рассчитывали по формуле [1]:

$$Q = 0,5 \cdot \pi \cdot DL (\Psi_2 \delta_2 - \Psi_1 \delta_1), \quad (1)$$

где  $D$  — внутренний диаметр цилиндра;  $L$  — длина хода цилиндра;  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  — функции, учитывающие различия в режимах трения при прямом и обратном ходе;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  — характерные зазоры при прямом и обратном ходе.

Зазоры  $\delta_1$  и  $\delta_2$  рассчитывали по формулам [1]:

$$\delta_1 = \alpha_1 \sqrt{\frac{8\mu V_1}{9p_1'}}, \quad \delta_2 = \alpha_2 \sqrt{\frac{8\mu V_2}{9p_2'}}, \quad (2)$$

где  $p_1', p_2'$  — максимальные значения градиентов давления при прямом и обратном ходе соответственно;  $V_1$  и  $V_2$  — скорости движения цилиндра при прямом и обратном ходе соответственно;  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — безразмерные коэффициенты.

Перетечки в статическом состоянии уплотнения рассчитывали по формуле [10]:

$$Q = \Psi_0 \frac{B}{L} \cdot \frac{\Delta P}{\mu} R_z^3 \cdot e^{-\frac{3p_k}{kE}}, \quad (3)$$

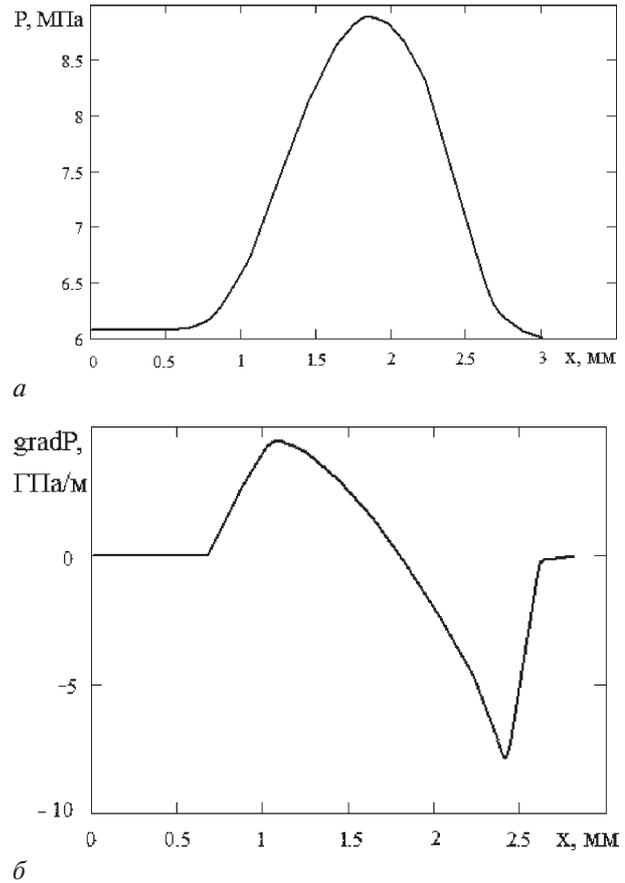
где  $Q$  — перетечки за 1 с ( $\text{см}^3/\text{с}$ );  $p_k$  — контактное давление на уплотняемой поверхности;  $k$  — коэффициент, зависящий от качества обработки поверхности уплотняющего элемента;  $\Psi_0$  — коэффициент, зависящий от качества обработки поверхности контртела;  $B$  — периметр уплотняющего элемента (м);  $L$  — ширина кольцевой поверхности уплотняющего элемента в контакте с контртелом (м);  $\Delta P$  — перепад давлений (МПа);  $\mu$  — динамическая вязкость (мПа·с);  $R_z$  — параметр шероховатости поверхности контртела (мкм);  $E$  — модуль Юнга материала уплотняющего элемента (МПа).

**Результаты исследования.** Проведенная верификация расчетной модели при использовании композита Ф4УВ6Г8М2 в качестве материала уплотняющего элемента показала приемлемые для практического использования результаты:

- расчетное значение объема перетечек жидкости в газовую полость превышает значение, полученное в стендовых испытаниях, в среднем на 50 % в зависимости от выбора значения произведения коэффициентов  $\Psi_2 \cdot \alpha_2$ ;
- расчетное значение массового износа уплотнительного элемента меньше значения, полученного в стендовых испытаниях, на 20 %.

Выполненный с использованием расчетной модели анализ НДС элементов герметизирующего устройства и влияния на него физико-механических характеристик материалов показал следующее. В условиях начального монтажного деформирования уплотнительного кольца и воздействия на него давлений разделяемых сред модуль Юнга ПКМ оказывает существенное влияние на параметры контактного взаимодействия и напряженно-деформированного состояния элементов ГУ. В качестве примера на рисунке 3 приведены распределения контактного давления и его градиента в статическом состоянии при использовании материала Ф4УВ6Г8М2.

Установлено, что при перемещении цилиндра, сопровождаемом увеличением давления разделяемых сред, возможно превышение предельных значений напряжений и (или) деформаций для некоторых ПКМ. Такой результат был получен для материалов Флубон-20 и НАМИ-ФБМ. Непригод-



**Рисунок 3 — Распределения параметров контактного взаимодействия по поверхности цилиндра для материала Ф4УВ6Г8М2 в статическом состоянии:**

*a* — контактное давление, *б* — градиент контактного давления

ность указанных материалов для изготовления уплотняющего элемента обусловлена низкими значениями предела прочности при растяжении ( $\sigma_p$ ) и относительного удлинения при разрыве ( $\epsilon_p$ ), а также в ряде случаев относительно высоким значением коэффициента трения, что приводит к значительным сдвиговым деформациям уплотняющего кольца в зоне контакта с цилиндром.

Расчеты показали, что при деформировании уплотняющего кольца, в зависимости от физико-механических характеристик используемого ПКМ, в нем возникают напряжения до 25–30 МПа и деформации около 0,25. В таблице приведены расчетные значения удельных перетечек за 2000 циклов ( $V$ ), соответствующий класс негерметичности (K1) в соответствии с классификацией [1], массовый износ уплотняющего элемента за 2000 циклов ( $m$ ), удельные перетечки в статическом состоянии ( $Q$ ) и соответствующий класс негерметичности (K2) для ряда исследованных материалов (данные приведены для вязкости рабочей жидкости, соответствующей температуре  $t = 20^\circ\text{C}$ ).

Из таблицы следует, что при работе рассматриваемого уплотнения в статическом состоянии минимальные перетечки  $Q$  возникают при использовании материала Ф4Г10, однако данный материал характеризуется наибольшей интенсивностью изнашивания и значительным массовым износом.

Таблица — Параметры, характеризующие износ и степень герметичности устройства

Материал	$V, \text{см}^3/\text{м}^2$	K1	$m, \text{мг}$	$Q \cdot 10^{-4}, \text{мм}^3/(\text{м} \cdot \text{с})$	K2
Криолон-5	0,12	2-2	3,7	1,42	1-1
Ф4УВ6Г8М2	0,21	3-1	7,1	1,31	1-1
Ф4Г10	0,16	2-2	19,5	1,28	1-1

За расчетное количество циклов возвратно-поступательного движения удельные перетечки  $V$  принимают наименьшее значение при использовании материала Криолон-5, однако относительно большое значение модуля Юнга этого материала приводит к наибольшим из рассматриваемых вариантов перетечкам в статическом состоянии. Тем не менее, достаточно высокая степень герметичности в стационарном состоянии позволяет рекомендовать именно этот материал для изготовления уплотнительного элемента. Нарботка до перехода в следующий класс негерметичности (из класса 2-2 в класс 3-1), сопровождающегося незначительным изменением удельной утечки, для Ф4УВ6Г8М2 составила примерно 800 циклов. Для материалов Криолон-5 и Ф4Г10 класс негерметичности 2-2 сохраняется в течение 2000 циклов. Следует отметить, что ни для одного из рассмотренных материалов не было превышено значение критического расхода герметизируемой среды.

**Выводы.** Предложена методика выбора герметизирующего материала, основанная на расчетном прогнозировании объемного напряженно-деформированного состояния уплотнительного элемента, параметров его контактного взаимодействия с жестким контртелом и степени герметичности контактного уплотнения пневмогидроцилиндра, определяемых с учетом формоизменения уплотнительного элемента вследствие изнашивания. Она была применена при разработке кольцевого уплотнения из углепластиков на основе ПТФЭ. Созданные конечноэлементные модели открыты для изменений и позволяют проводить анализ функционирования герметизирующих устройств данного типа.

#### Список обозначений

$D$  — внутренний диаметр цилиндра;  
 $L$  — длина хода цилиндра;  
 $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  — функции, учитывающие различия в режимах трения при прямом и обратном ходе;  
 $\delta_1$  и  $\delta_2$  — характерные зазоры при прямом и обратном ходе;

$p_1', p_2'$  — максимальные значения градиентов давления при прямом и обратном ходе соответственно;  
 $V_1$  и  $V_2$  — скорости движения цилиндра при прямом и обратном ходе соответственно;  
 $m$  — динамическая вязкость жидкости;  
 $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — безразмерные коэффициенты;  
 $Q$  — перетечки за 1 с (в  $\text{см}^3/\text{с}$ );  
 $p_k$  — контактное давление на уплотняемой поверхности;  
 $k$  — коэффициент, зависящий от качества обработки поверхности уплотняющего элемента;  
 $\Psi_0$  — коэффициент, зависящий от качества обработки поверхности контртела;  
 $B$  — периметр уплотняющего элемента (м);  
 $L$  — ширина поверхности уплотняющего элемента в контакте с контртелом (м);  
 $\Delta P$  — перепад давлений (МПа);  
 $\mu$  — динамическая вязкость (МПа·с);  
 $R_z$  — параметр шероховатости контртела (мкм);  
 $E$  — модуль Юнга для материала уплотняющего элемента (МПа).

#### Список литературы

1. Уплотнения и уплотнительная техника / Л. А. Кондаков [и др.]; под общ. ред. А.И. Голубева и Л. А. Кондакова. — М.: Машиностроение, 1986. — 464 с.
2. Ереско, С.П. Математическое моделирование, автоматизация проектирования и конструирование уплотнений подвижных соединений механических систем. — М.: Изд-во ИАП РАН, 2003. — 155 с.
3. Методология вероятностного прогнозирования безотказности и ресурса трибосопряжений / А.В. Анцупов [и др.] // Изв. Самарского научного центра РАН. — 2011. — Т. 13, № 4(3). — С. 19–22.
4. Weber, D. Wear behavior of PTFE lip seals with different sealing edge designs, experiments and simulation / D. Weber, W. Haas // Sealing Technology. — February 2007. — Pp. 7–12.
5. Wear and friction of PTFE seals / H. Sui [et al.] // Wear. — 1999. — № 224. — Pp. 175–182.
6. Кропотин, О.В. Разработка элементов герметизирующих устройств трибосистем и анализ их напряженно-деформированного состояния с использованием метода конечных элементов / О.В. Кропотин, Ю.К. Машков, В.П. Пивоваров // Трение и износ. — 2004. — Т. 25, № 5. — С. 461–465.
7. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация / Ю.К. Машков [и др.]. — М.: Машиностроение, 2005. — 240 с.
8. Структурная модификация политетрафторэтилена скрытокристаллическим графитом / Ю.К. Машков // Физич. мезомеханика. — 2007. — Т. 10, № 6. — С. 109–114.
9. Машков, Ю.К. Разработка и оптимизация новых материалов и технологий для металлополимерных узлов трения микрокриогенной техники с использованием структурного анализа и термодинамических критериев: дис. ... докт. техн. наук / Ю.К. Машков. — Омск, 1990. — 387 с.
10. Кондаков, Л.А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем / Л.А. Кондаков. — М.: Машиностроение, 1982. — 216 с.

Kropotin O.V., Mashkov Yu.K., Shilko S.V.

#### Form change of elements of contact seals during frictional interaction

By using a finite-element method the form change of elements of the seal and its influence on the mode of deformation and a degree of leaktightness are investigated.

Поступила в редакцию 30.11.2012.