

**ГЕРМЕТИЗАЦИЯ КЛАПАННЫХ УПЛОТНЕНИЙ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ СРЕД**

**Ю.И. Кондрашов,  
Е.Н. Ермилова,  
А.Н. Видяскина,**

Самарский национальный  
исследовательский университет  
имени академика С. П. Королёва

Московское шоссе, 34,  
г. Самара, Российская Федерация,  
443086

ermilova6488@gmail.com

*В статье представлена методика расчета герметичности стыка клапанных пар различного типа, предназначенных для эксплуатации в экстремальных условиях использования криогенных сред. При воздействии криогенных температур (ниже  $-120^{\circ}\text{C}$ ) происходит существенное изменение механических свойств контактирующих в клапанной паре материалов (повышается  $\sigma_{\text{вр}}$ , предел текучести и другие механические характеристики материалов). Такое изменение механических свойств требует существенного увеличения контактирующего усилия для герметизации. В статье была определена проводимость стыка и величина натекающей рабочей среды для различных видов поверхностей контакта клапанных пар.*

**Ключевые слова:** клапанное уплотнение; зазор; рельеф; контактирующая поверхность; криогенная среда; герметизация; деформация; проводимость

**1 Введение**

Многообразие задач, решаемых агрегатами пневмогидроавтоматики, привело к большому разнообразию клапанных уплотнений (КУ). На практике наибольшее распространение получили плоские, конические, сферо-конические и ножевые КУ. При этом имеет место следующее сочетание материалов элементов КУ: металл-по-металлу, металл-по-резине, металл-по-полимеру. Теоретические подходы к оценке герметичности КУ основываются на рассмотрении влияния микрозазоров, микрорельефа контактирующих уплотнительных поверхностей [1, 2, 3, 4, 5, 6]. При этом для повышения степени герметичности КУ рассматриваются:

- улучшение микрорельефа уплотнительных поверхностей, путем повышения качества доводки различными технологическими методами обработки;
- уменьшение микрозазоров за счет увеличения силы контактирования;

- заполнение микрозазоров за счет использования эластомеров или пластичных материалов;

- компенсация неровностей поверхности (отклонений от заданной микрогеометрии) за счет использования гибких элементов и других конструктивных решений.

В общем различные способы герметизации КУ основаны на деформации контактирующих элементов в связи с чем КУ могут быть классифицированы по следующим конструктивным признакам:

- по жесткости элементов – с жесткими и гибкими элементами;
- по характеру деформаций – с упругой деформацией, с пластической деформацией всего уплотнителя, с пластической деформацией поверхностного слоя одного из элементов уплотнителя;
- по материалу контактирующих элементов – металл по металлу (твердый по твердому, твердый по мягкому, твердый по твердому с мягким покрытием), металл по неметаллу (металл по эластомеру, металл по

полимеру, металл по полимерному покрытию, металл по керамике);

- по форме уплотнительных поверхностей – плоские, конические, сферические, тороидальные с острой кромкой ( $R < 0,1 \text{ мм}$ ), ножевые;

- по ширине контакта – по поверхности, по линии (ширина до 0,3 мм).

На практике чаще всего выбор параметров контактирующих поверхностей КУ осуществляется с помощью использования различных эмпирических зависимостей, полученных экспериментально для различных классов материалов и связывающих контактное усилие, потребное для герметизации соединения с размерами контактирующих поверхностей.

В гораздо более жестких условиях должны работать клапанные уплотнения агрегатов, предназначенные для эксплуатации в экстремальных условиях, особенно при температуре рабочей или окружающей среды в интервалах от  $-253 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+350 \text{ }^\circ\text{C}$  и выше [2, 3, 4, 6, 9]

К таким уплотнениям, наряду с обычными требованиями по безотказности работы, устойчивости к воздействию механических нагрузок, ресурсу, минимальности потребного усилия для герметизации, минимальности допускаемой утечки в течении значительного гарантийного и назначенного срока службы и др. предъявляются специфические требования, основными из которых следует считать следующие :

Клапанные уплотнения зачастую должны работать как на жидком и газообразном продукте, так и на двухсредной смеси;

Клапанные уплотнения должны быть герметичны как при экстремальной температуре рабочей и окружающей среды, так и в нормальных условиях;

Конструкция клапанных уплотнений должна компенсировать значительные изменения свойств применяемых материалов в этих условиях использования.

## 2 Методика расчета проводимости клапанных пар

В настоящее время для герметизации криогенных сред применяются клапанные пары плоского или конусного типа, требующие повышенных требований по геометрии исполнения. При этом использование полимеров в качестве уплотнительного элемента становится не перспективным при температурах ниже  $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ , поскольку пластические свойства уплотнительного элемента ухудшаются в десятки раз. Например, при температуре  $-254 \text{ }^\circ\text{C}$  пластические свойства фторопласта ухудшаются в  $\sim 60 \dots 80$  раз при одновременном снижении ударной прочности.

В связи с этим заслуживают внимания клапанные пары металл-по-неметаллу.

Работоспособность клапанных пар металл-по-неметаллу определяется воздействием большого количества различных факторов как при изготовлении и монтаже клапанных пар, так и в условиях эксплуатации.

К числу определяющих факторов отнесены: динамические явления, возникающие при герметизации клапанных пар; технологическая наследственность клапанных пар; параметры макро- и микрорельефа; физико-механические характеристики материалов клапанной пары при криогенных температурах; конструктивная схема уплотнения.

Исследование влияния динамических явлений при герметизации преследовало цель определения коэффициента динамичности для клапанных пар различного конструктивного исполнения и тем самым анализа реальных контактных давлений герметизации. При этом учитывались соображения минимализации погонных усилий герметизации (снижения энергоёмкости привода) и повышение работоспособности клапанов [7, 8].

Анализ влияния рельефа уплотняющих поверхностей на герметичность преследовал целью создание оптимальной технологии

обработки клапанных пар, обеспечивающей герметичность при минимальных контактных давлениях и повышенную работоспособность.

Влияние физико-механических характеристик циклического взаимодействия необходимо рассматривать в следующих направлениях: кинематика измерения физико-механических характеристик материалов клапанной пары при работе в криогенных средах; анализа возможных разрушений поверхностного слоя.

Рассмотрим влияние одного из главных факторов, определяющих усилие герметизации клапанных пар для криогенных сред. В работах [4, 5, 6] проводимость стыка определяется характером контактирования продольных микронеровностей. Проводимость стыка при этом определяется проводимостью зазоров в виде треугольников, образованных контактирующими выступами и проводимостью щели, образованной неконтактирующими выступами. Однако с увеличением сближения уплотняющих поверхностей под воздействием усилия, создаваемого с помощью различных приводов и прилагаемого для обеспечения герметичности стыка, число контактирующих выступов увеличивается, и можно с некоторым приближением считать, что проводимость стыка будет определяться проводимостью микрозазоров в виде треугольников (рисунок 1).

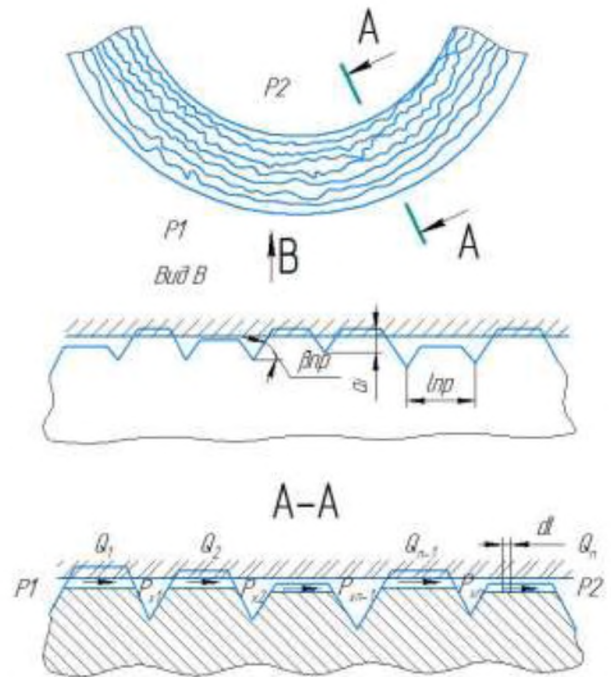


Рисунок 1 – Схема контакта уплотняемых поверхностей

В общем случае закон распределения впадин можно описать уравнением:

$$\gamma(\varepsilon) = \frac{\mathcal{G}_r}{\mathcal{G}_e} = c \cdot \varepsilon^\omega, \quad (1.1)$$

где  $\mathcal{G}_r$  – количество впадин при заданном сближении;

$\mathcal{G}_e$  – число всех впадин;

$\varepsilon$  – относительное сближение;

$c, \omega$  – константы, характеризующие функции распределения продольных неровностей.

В дальнейшем будем рассматривать закон распределения, в котором  $\omega = 1$ ,  $c = \frac{h_{\max}}{h_{np\max}}$ ,

где  $h_{\max}$  – максимальная высота неровностей;

$h_{np\max}$  – предельная максимальная высота продольных неровностей.

Размеры микрозазоров, по которым натекает рабочая среда, исходя из высоты единичного треугольника :

$$a_i = h_{bi} - \varepsilon \cdot h_{\max}, \quad (1.2)$$

где  $h_{bi}$  – величины впадин;

$h_{\max}$  – максимальная высота неровностей.

Величина основания треугольника:

$$b_i = 2 \arctg \beta_{np} \cdot h_{np \max} \cdot \quad (1.3)$$

Длина трубопровода:

$$l = \frac{l_{np} \cdot l_{non} \cdot q_c}{(l_{np} - 2a_{i\max} \cdot ctg \beta) \cdot c \cdot \sigma_s},$$

где  $l_{np}$  – шаг продольных неровностей;

$l_{non}$  – шаг поперечных неровностей;

$q_c$  – удельное контурное давление;

$\sigma_s$  – предел текучести;

$c \approx 3$

Проводимость стыка длиной  $l_{non}$ :

$$U' = \sum_{i=1}^{n_{np}} U_i, \quad (1.4)$$

где  $U_i$  – проводимость  $i$ -того треугольника;

$n_{np}$  – число выступов в стыке шириной  $l_{non}$ .

Для определения проводимости необходимо знать режимы течения газов через соответствующие микрозоры, которые характеризуются отношением длины свободного пробега молекул при заданных условиях (давление, температура) и размеров микрозоров.

Различают молекулярный, вязкостный и промежуточный режимы течения газов.

При изменении сближения уплотняющих поверхностей, температуры и давления газа режимы течения могут изменяться. Они изменяются также по ширине уплотнения, вследствие изменения давления в стыке по ширине уплотнения. Поэтому вести расчет проводимости для молекулярного и вязкостного режима нецелесообразно. В этом отношении следует пользоваться полуимперической формулой Кнудсена для промежуточного режима:

$$U = U_e + Z \cdot U_m,$$

где  $Z \approx 0,9$ ;

$U_e$  – проводимость при вязкостном режиме;

$U_m$  – проводимость при молекулярном режиме.

Проводимость трубопровода при молекулярном режиме:

$$U_{im} = \frac{4860 a_i^3}{l \cdot tg \beta_{np}} \sqrt{\frac{T}{M}} \left[ \frac{cm^3}{сек} \right], \quad (1.5)$$

где  $T$  – абсолютная температура;

$M$  – молекулярный вес.

При вязкостном режиме:

$$U_{iv} = \frac{2000 a_i^4 \cdot \bar{P}}{l \cdot \eta \cdot tg \beta_{np}} \sqrt{\frac{T}{M}} \left[ \frac{cm^3}{сек} \right], \quad (1.6)$$

где  $\bar{P}$  – среднее давление;

$\eta$  – вязкость газа в  $\left[ \frac{H \cdot сек}{M^3} \right]$ .

Проводимость всех треугольных трубопроводов при некотором сближении  $\varepsilon$  в общем случае можно описать уравнением:

$$U = \sum U_i = K \sum a_i^n, \quad (1.7)$$

где  $K$  – коэффициент;

$n = 3, 4$ ;

$$a_i = h_{\max} (X - \varepsilon); \quad (1.8)$$

$X$  – текущее значение  $\varepsilon$ ;

Используя уравнение (1.1) найдем  $d\mathcal{G}_r$  при  $\omega=1$ :

$$d\mathcal{G}_r = \frac{\mathcal{G}}{n_{пол}} c dx. \quad (1.9)$$

Считая, что функция  $\gamma \varepsilon$  непрерывна, имеем:

$$\sum_{\varepsilon}^{\varepsilon_k} a_i = \int_{\varepsilon}^{\varepsilon_k} h_{\max}^n (X - \varepsilon)^n \frac{\mathcal{G}_c}{n_{пол}} c dx = \frac{h_{\max}^n \mathcal{G}_c \cdot c (\varepsilon_k - \varepsilon)^{n+1}}{n_{пол} (n+1)}, \quad (1.10)$$

$$\text{где } \varepsilon_k = \frac{h_{np \max}}{h_{\max}}.$$

Тогда:

$$U = \frac{h_{\max}^3 \mathcal{G}_c \cdot c (\varepsilon_k - \varepsilon)^4}{n_{пол} l \cdot tg \beta_{np}} \cdot \left[ 993,5 \sqrt{\frac{T}{M}} + \frac{400 h_{\max} (\varepsilon_k - \varepsilon) \bar{P}}{\eta} \right] \quad (1.11)$$

В установившемся режиме течения газа:

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n, \quad (1.12)$$

где  $n = \frac{B}{l_{пол}} - 1$ ;



$B$  – ширина уплотнения.

Для элемента  $dl$ , которому соответствует перепад давления  $dP$ , можно записать:

$$Q = \frac{dP}{dW}; \quad (1.13)$$

где  $dW$  – сопротивление (импеданс) элемента  $dl$ .

Уравнение 1.11 можно записать в виде:

$$U = \frac{A}{l}(B - CP); \quad (1.14)$$

где

$$A = \frac{h_{\max}^3 \cdot \vartheta_c c (\varepsilon_\kappa - \varepsilon)^4}{n_{\text{пол}} \cdot \text{tg} \beta_{\text{np}}}; \quad (1.15)$$

$$B = 993,5 \sqrt{\frac{T}{M}}; \quad (1.16)$$

$$C = \frac{400 h_{\max} (\varepsilon_\kappa - \varepsilon)}{\eta}; \quad (1.17)$$

Следовательно:

$$Q = A(B + CP) \frac{dP}{dl}; \quad (1.18)$$

Откуда:

$$Q = \int_0^l dl \cdot Ql = \int_{Pr}^{P_{xn}} A(B - CP) dP; \quad (1.19)$$

$$Q = \frac{AB}{l} (P_{xn} - P_2) + \frac{AC}{l} (P_{xn}^2 - P_2^2); \quad (1.20)$$

Можно определить из следующей системы уравнений, полученной при сравнении потоков газа  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1(B + \frac{CP_1}{2}) - 2P_{x1}(B + \frac{CP_{x1}}{2}) + \\ + P_{x2}(B + \frac{CP_{x2}}{2}) = 0 \\ P_{x1}(B + \frac{CP_{x1}}{2}) - 2P_{x2}(B + \frac{CP_{x2}}{2}) + \\ + P_{x3}(B + \frac{CP_{x3}}{2}) = 0 \\ \dots \\ \bar{P}_{xn-1}(B - \frac{C\bar{P}_{xn-1}}{2}) - 2P_{xn}(B + \frac{CP_{xn}}{2}) + \\ + \bar{P}_2(B + \frac{C\bar{P}_2}{2}) = 0 \end{array} \right. \quad (1.21)$$

Решая систему уравнений (1.21) получим:

$$\begin{aligned} & \frac{C}{2} P_{xn}^2 + BP_{xn} - \frac{1}{n+1} P_1(B + \frac{CP}{2}) - \\ & - \frac{n}{n+1} P_2(B + \frac{CP_2}{2}) = 0; \end{aligned} \quad (1.22)$$

$$P_{xn} = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 2c \left[ \frac{1}{n+1} P_1 \left( B + \frac{CP_1}{2} \right) + \frac{n}{n+1} P_2 \left( B + \frac{CP_2}{2} \right) \right]}}{C} \quad (1.23)$$

Подставляя  $A, B, C$  и  $P_{xn}$  в (1.20) определяем поток газа через уплотнение.

Сближение контактирующих поверхностей определяют согласно (1), например, для пластического контакта:

$$\varepsilon = \left( \frac{q_c}{c\sigma_s b} \right)^{\frac{1}{v}} \quad (1.24)$$

где  $v, b$  – параметры опорной кривой.

Для определения герметичности стыка клапанных пар конусного типа (рисунок 2) необходимо определить сближение контактирующих поверхностей при совместном действии нормальной и касательной нагрузках.

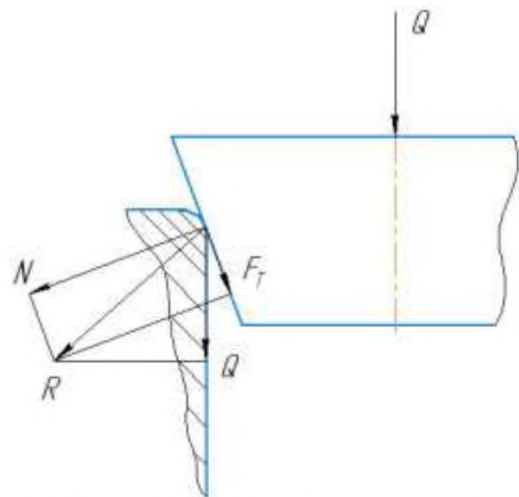


Рисунок 2 – Клапан конусного типа

В том случае, когда высота неровностей превышает упругую деформацию полупространства, контактные деформации определяются внедрением (смятием)

микронеровностей. Следовательно, в этом случае радиус R определяет распределение микронеровностей по высоте относительно гладкой поверхности и кривую опорной поверхности шероховатого слоя также относительно гладкой поверхности.

Кривая опорной поверхности в этом случае примет вид:

$$r = b^* \left( \frac{d}{h_{\max}} \right)^v, \quad (1.25)$$

где

$$b^* = b \frac{\Gamma(0,5)\Gamma(v+1)}{2\Gamma(v+1,5)}. \quad (1.26)$$

Здесь  $\Gamma$  – гамма-функция.

Сближение поверхностей  $\varepsilon$  согласно (1.14) и учитывая, что ширина контакта  $B = 2\sqrt{2Rh_{\max}\varepsilon}$  равно:

$$\varepsilon = \left( \frac{N}{2\pi\sqrt{2Rh_{\max}b^*c\sigma_s}} \right)^{\frac{1}{v+0,5}}; \quad (1.27)$$

где

$$N = \frac{Q}{\sin\alpha + f\cos\alpha}, \quad (1.28)$$

$f$  – коэффициент трения.

В том случае, когда величина упругой деформации полупространства превышает высоту микронеровностей, ширину зоны контакта определяют согласно Герцу, а затем определяют сближение, считая, что при приложении нагрузки на стык образуется практически плоская контурная площадка касания.

При одновременном действии нормальной и касательной нагрузки сближение согласно (12) определяется:

$$\varepsilon_{\kappa} = \left( 2\sqrt{1+f^2} \right)^{\frac{1}{v}} \varepsilon. \quad (1.29)$$

Так, как сближение изменяется по ширине контакта, то для расчетов проводимости следует брать среднее значение, которое равно:

$$\varepsilon_{cp} = \frac{2}{3} \varepsilon_{\kappa}. \quad (1.30)$$

Методика расчета проводимости клапанных пар конусного типа аналогична

методике определения проводимости плоских клапанных пар.

Методика определения натеканий для волнистой поверхности аналогична определению натеканий для шероховатой поверхности. Только вместо  $v$  и  $b$  следует использовать:

$$v^* = v + 0,5 \quad (1.31)$$

$$b^* = b \left( \frac{H_b + h_{\max}}{H_b} \right)^{0,5} \cdot \frac{\Gamma(0,5)\Gamma(v+1)}{2\Gamma(v+1,5)} \quad (1.32)$$

А вместо  $h_{\max}$  и  $h_{pr\max}$  использовать суммы  $h_{\max} + H_b$ , где  $H_b$  – высота волны.

Следует отметить, что формулы (1.31) и (1.32) используют для случая, когда высота волн не превышает высоту неровностей.

В случае, когда высота волн значительно отличается от шероховатости или когда необходимо учитывать отклонения форм сопрягаемых поверхностей, следует при определении натеканий в формулу (1.20) ввести слагаемое, учитывающее дополнительную проводимость щели, образованной вышеперечисленными факторами. При этом вышеприведенные формулы будут соответствовать контурной площади.

### 3 Заключение

К уплотнениям агрегатов, работающих в экстремальных условиях криогенных сред, предъявляются повышенные требования герметичности. Такие уплотнения должны обеспечивать герметичность в широком интервале рабочих температур. При этом сама рабочая среда может находиться в двухфазном состоянии, что существенно меняет картину герметизации соединяемой клапанной пары, в том числе и при изменении механических свойств контактирующих материалов от температурного воздействия рабочей среды. Кроме того, зачастую некоторые криогенные среды не обладают смазывающим эффектом, что также усложняет процесс герметизации соединения.

Предложенная выше методика позволяет рассчитать проводимость стыка контактных поверхностей клапанных пар плоского и конического типа при промежуточном режиме течения газа.

#### Список использованных источников

- [1] Кармугин, Б.В. Клапанные уплотнения пневмогидроагрегатов / Б.В. Кармугин, Г.Г. Стратиневский, Д.А. Мендельсон – М.: Машиностроение, 1983. – 152 с.
- [2] Гуревич, Д.Е. Конструирование и расчет трубопроводной арматуры. — Л.: Машиностроение, 1969. - 887 с.
- [3] Рот, А. Вакуумные уплотнения – М.: Энергия, 1971. – 464 с.
- [4] Эдельман, А.И. Топливные клапаны жидкостных реактивных двигателей – М.: Машиностроение, 1970. – 244 с.
- [5] Кармугин, Б.В. Современные конструкции малогабаритной пневмоарматуры / Б.В. Кармугин, В.Л. Кисель, А.Г. Лазебник – Киев: Техника, 1980. – 295 с.
- [6] Журавлев, О.А. Визуализация структуры потока газа при разупрочнении клапана / О.А. Журавлев [и др.] // 12 Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков» – Москва: НИУМЭИ, 2013.
- [7] Гафуров, С.А. Экспериментальное исследование динамической нагруженности

уплотнительных элементов клапанной пары от подвижных частей пневмопривода / Гафуров С.А., Кондрашов Ю.И., Салмина В.А. // Динамика и виброакустика машин : материалы третьей международной научно-технической конференции– Самара: Самарский университет, 2016. –С. 218 с.

[8] Кондрашов, Ю.И. О некоторых вопросах оценки герметичности клапанных уплотнений / Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника – Самара : Самарский университет, 2017. – С. 155-164.

[9] Рыжов, Э.Б. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках / Э.Б. Рыжов, Ю.В. Колесников, А.Г. Суслов – Киев: Наукова думка, 1982. – 172 с.

[10] Огар, П.М. Исследование влияния контактных давлений в деталях уплотнительных соединений на их герметичность : Автореф. дис. канд. тех. наук – Львов, 1983. – 220 с.

[11] Сейнов, С.В. Обеспечение основных показателей качества трубопроводной арматуры клапанного типа при проектировании, изготовлении и эксплуатации // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Технологическое управление триботехническими характеристиками узлов машин». – М.:Знание, 1983. – С. 209-210.

[12] Дёмкин, Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей – М: Наука , 1970. – 227с.

[13] Рыжов, Э.В. Контактная жёсткость деталей машин – М: Машиностроение, 1966.

## HERMETIZATION OF VALVE SEALS FOR CRYOGENIC FLUIDS

**Yuriy I. Kondrashov,  
Anna N. Vidyaskina,  
Elena N. Ermilova,**

Samara National Research University

34, Moskovskoe shosse, Samara,  
443086, Russian Federation

ermilova6488@gmail.com

*For units providing flow control for cryogenic fluids and operating under conditions of a significant change in the temperature range from positive to cryogenic and in a two-phase state of the working fluid, the problem of sealing the closure members of the units (valve pairs) becomes urgent.*

*Joint sealing is ensured by creating contact pressure in the joint through deforming the roughness peaks obtained by surface treatment of the valve pair.*

*The mechanical properties of the materials of the contacting valve pairs change significantly under the influence of cryogenic temperatures. First of all, the plastic properties are reduced, therefore, the creation of increased contact pressure is required.*

*The article presents a methodology for evaluation of changes in the microgeometry of contacting surfaces depending on the specific contact pressure. It also allows one to evaluate the conductivity of microgaps in the viscous and molecular regimes of fluid flow through contacting surfaces.*

**Key words:** valve seal; microgap; surface geometry; contact surfaces; cryogenic fluid; hermetization; deformation; conductivity.

## References

- [1] Karmugin, B.V. Klapannye uplotneniya pnevmogidroagregatov [Valve seals of pneumatic hydraulic units] / B.V. Karmugin, G.G. Stratinevskij, D.A. Mendel'son – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. – 152 p.
- [2] Gurevich, D.E. Konstruirovaniye i raschet truboprovodnoj armatury [Design and calculation of pipe fittings]. — Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1969. – 887 p.
- [3] Rot, A. Vakuurnyye uplotneniya [Vacuum seals] – Moscow: Energiya Publ., 1971. – 464 p.
- [4] Edel'man, A.I. Toplivnyye klapany zhidkostnykh reaktivnykh dvigatelej – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1970. – 244 p.
- [5] Karmugin, B.V. Sovremennyye konstrukcii malogabaritnoy pnevmoarmatury [Jet Engine Fuel Valves] / B.V. Karmugin, V.L. Kisel', A.G. Lazebnik – Kiev: Tekhnika Publ., 1980. – 295 p.
- [6] Zhuravlev O.A., Sergeev R.N., Ivchenko A.V., Kondrashov Yu.I. Vizualizatsiya struktury potoka gaza pri razuprochnenii klapana. Proc. XII International Scientific and Technical Conference «Optical methods of flow investigation». Moscow: Moscow Power Engineering Institute Publ., 2013. (In Russ.)
- [7] Yuri I. Kondrashov, Salimzhan A. Gafurov, Vera A. Salmina. Experimental research of dynamic loading the sealing elements of the valve pair from moving parts pneumatic actuator. The 3rd International Conference «Dynamics and vibroacoustics of machines». Samara: Samara National Research University Publ., 2016. p. 218 (In Russ)
- [8] Kondrashov Yu.I., Sergeev R.N. Advanced methods for assessing sealing ability of valve seals. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2017. V. 16, no. 3. P. 155-164. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-155-164
- [9] Ryzhov, E.B. Kontaktirovaniye tverdykh tel pri staticheskikh i dinamicheskikh nagruzkakh [Contacting solids under static and dynamic loads] / E.B. Ryzhov, YU.V. Kolesnikov, A.G. Suslov – Kiev: Naukova dumka Publ., 1982. – 172 p.
- [10] Ogar, P.M. Issledovaniye vliyaniya kontaktnykh davlenij v detalyah uplotnitel'nykh soedinenij na ih germetichnost' [Investigation of the effect of contact pressures in the details of sealing joints on their tightness]: Doct.Diss. – L'vov, 1983. – 220 s.
- [11] Sejnov, S.V. Obespecheniye osnovnykh pokazatelej kachestva truboprovodnoj armatury klapannogo tipa pri proektirovanii, izgotovlenii i ekspluatatsii [Ensuring the main quality indicators of valve-type pipe fittings during the design, manufacture and operation]// All-Union Scientific and Technical Conference «Technological management of tribological characteristics of machine components» – Moscow: Znanie Publ., 1983. – pp. 209-210.
- [12] Dyomkin, N.B. Kontaktirovaniye sherohovatykh poverhnostej – Moscow: Nauka Publ., 1970. – 227 p.
- [13] Ryzhov, E.V. Kontaktnaya zhyostkost' detalej mashin [Contact stiffness of machine parts] – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1966. – 193 p