

## Расчет утечки газовой среды через стык разъемных соединений при повышенных энергетических параметрах

П.М. Огар<sup>а</sup>, А.А. Соболевский<sup>б</sup>

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>а</sup>ogar@brstu.ru, <sup>б</sup>yeloyblybas@mail.ru

Статья поступила 2.07.2016, принята 15.08.2016

*Уплотнительный стык представлен как контакт жесткой шероховатой поверхности с упругопластическим полупространством со свойствами меди М1 при нормальной и повышенных температурах. Для описания упругопластического упрочняемого материала использован степенной закон Холломоны. Определены параметры упрочняемости полупространства при разных температурах. Жесткая шероховатая поверхность представлена в виде набора одинаковых сферических сегментов, распределение которых по высоте соответствует опорной кривой профиля реальной поверхности. Приведены выражения для определения относительной площади контакта, плотности зазоров в стыке и функционала проницаемости в зависимости от безразмерной нагрузки для разных температур. Предложена методика расчета величины утечки через уплотнительный стык затворов трубопроводной арматуры и сосудов высокого давления в зависимости от контактных характеристик, доли эффективных микроканалов и свойств реального газа. Для точного описания реальных свойств технически важных газов в широком диапазоне давлений и температур используется уравнение состояния в вириальной форме. Представлены соответствующие графические зависимости изменения плотности и вязкости газа для разных температур и давлений.*

**Ключевые слова:** герметичность соединений; величина утечки; повышенные температуры; уплотнительный стык; контактирование шероховатых поверхностей; характеристики упрочняемости; относительная площадь контакта; плотность зазоров; функционал проницаемости; реальный газ; высокое давление; уравнение состояния газа.

## Calculation of gas medium leakage through a butt joint of detachable connections at increased energy parameters

P.M. Ogar<sup>а</sup>, A.A. Sobolevsky<sup>б</sup>

Bratsk State University, 40, Makarenko st., Bratsk, Russia

<sup>а</sup>ogar@brstu.ru, <sup>б</sup>yeloyblybas@mail.ru

Received 2.07.2016, accepted 15.08.2016

*The sealing joint is presented as a contact of a rigid rough surface with the elastic-plastic half-space with properties of copper M1 at normal and increased temperatures. To describe the elastic-plastic hardening material, the power Hollomon law is used. Hardening parameters of the half-space are defined under various temperatures. Rigid rough surface is presented in the form of a set of identical spherical segments, the height distribution of which corresponds to the bearing profile curve of the real surface. The equations are given to determine the relative contact area and the density of gaps on dimensionless the force elastic geometrical parameter. The method is proposed to calculate leakage value through the sealing joint of the gates in pipeline valves and high-pressure vessels, depending on the contact characteristics, the ratio of effective micro-channels and properties of the real gas. For an accurate description of the real properties of technically important gases, in a wide range of pressures and temperatures, the equations of the state are used in virial form. Corresponding graphic dependences for changes in gas density and viscosity are presented for various temperatures and pressures.*

**Key words:** joint tightness; leakage value; increased temperatures; sealing joint; contact of rough surfaces; hardening characteristics; relative contact area; density of gaps; penetrating functional; real gas; high pressure; gas law.

### Введение

Герметичность уплотнительных соединений обеспечивается нагружением их контактными давлениями герметизации и в значительной мере зависит от контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, которое характеризуется видом контакта, сближением поверхностей, относительной площадью контакта и плотностью зазоров в стыке [1–3]. В зависимости от свойств материалов и параметров микрогеометрии различают упругий, вязкоупругий, упругопластический и жесткопластический контакты. Для герметизации среды с высокими энергетическими параметрами (давление свыше 40 МПа и температура свыше 300 °С) в ос-

новном используют металлические материалы [4]. В большинстве случаев при контактировании металлических шероховатых поверхностей контакт является упругопластическим [5]. В этой связи в последние годы авторами рассмотрены вопросы, связанные с внедрением жесткой сферы в упругопластическое упрочняемое полупространство [6–10 и др.], что составило теоретическую основу для определения контактных характеристик — относительной площади контакта и плотности зазоров в стыке при внедрении жесткой шероховатой поверхности в упругопластическое полупространство [11–13]. Это в конечном итоге позволило определить влияние характеристик упрочняемого материала

на герметизирующую способность уплотнительных соединений [14], которая определяется функционалом проницаемости. Ранее функционал проницаемости был определен только для упругого контакта шероховатых поверхностей [15; 16]. Результаты работ [11; 13] получены для температуры  $T = 20^\circ\text{C}$ , поэтому практический интерес представляют изменения утечки газовой среды с ростом температуры, которые связаны с функционалом проницаемости уплотнительного стыка и свойствами реальных газов [4].

**Контакт шероховатых поверхностей.** Так как контакт двух шероховатых поверхностей можно рассматривать как контакт эквивалентной шероховатой поверхности с гладкой, рассмотрим контакт жесткой шероховатой поверхности с упругопластическим полупространством.

В зарубежной литературе при описании упругопластического упрочняемого материала широко используется степенной закон Холломона (Hollomon's power law):

$$S = \begin{cases} \varepsilon E, & \varepsilon \leq \varepsilon_y; \\ \sigma_y^{1-n} E^n \varepsilon^n, & \varepsilon > \varepsilon_y; \end{cases} \quad (1)$$

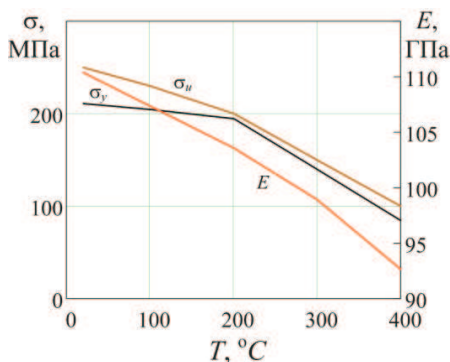
где  $s$  — истинное напряжение;  $n$  — экспонента упрочнения;  $\varepsilon_y = \sigma_y / E$ ,  $\sigma_y$  — предел текучести,  $E$  — модуль упругости.

Значение экспоненты упрочнения  $n$  можно определить по параметрам условной диаграммы растяжения  $\sigma_y$  и  $\sigma_u$ , используя следующее выражение [17]:

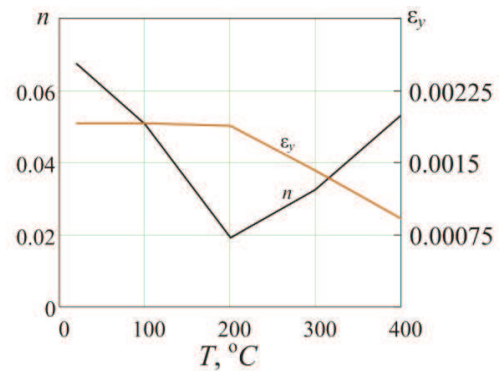
$$5,215n + n \ln n - \ln \left( \frac{\sigma_u}{\sigma_y} \right) = 0, \quad (2)$$

где  $\sigma_u$  — предел прочности.

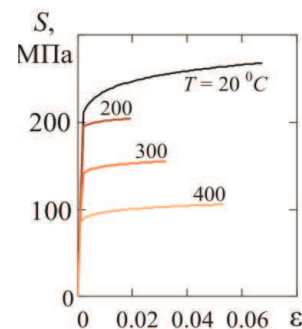
В уплотнительной технике широко применение для прокладок и покрытий находит медь М1, поэтому в рассматриваемой задаче полупространству присваиваем свойства меди М1. Зарубежным аналогом меди М1 является материал С11000, свойства которого при повышенных температурах приведены в [18; 19] и показаны на рис. 1. Значения экспоненты упрочнения  $n$  при повышенных температурах определены с использованием выражения (2) и представлены на рис. 2. Соответствующие диаграммы истинных напряжений приведены на рис. 3.



**Рис. 1.** Механические свойства меди С11000 при повышенных температурах [18; 19]



**Рис. 2.** Изменения параметров степенного закона Холломона



**Рис. 3.** Диаграммы истинных напряжений меди С11000 при повышенных температурах

Воспользуемся дискретной моделью шероховатости, в которой микронеровности представлены в виде набора одинаковых сферических сегментов, распределение которых по высоте соответствует опорной кривой профиля реальной поверхности [11–13]. Для описания опорной кривой используем распределение неполной бета-функции:

$$\eta(\varepsilon) = \frac{B_\varepsilon(p, q)}{B(p, q)}, \quad (3)$$

где  $B_\varepsilon(p, q)$ ,  $B(p, q)$  — соответственно неполная и полная бета-функции;  $p$  и  $q$  определяются высотными параметрами шероховатости.

В этом случае плотность функции распределения неровностей по высоте:

$$\varphi'_n(u) = \frac{u^{p-2}(1-u)^{q-2}[(p-1)(1-u) - (q-1)u]}{\varepsilon_s^{p-1}(1-\varepsilon_s)^{q-1}}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_s$  определяется из условия  $\varphi_n(\varepsilon_s) = 1$  [11–13].

Геометрические параметры сферического сегмента: высота  $\omega R_{\max}$ , где  $\omega = 1 - \varepsilon_s$ ; радиус основания  $a_c$ ; радиус:

$$R = \frac{a_c^2}{2\omega R_{\max}}, \quad (5)$$

где  $R \gg R_{\max}$ ,  $R_{\max}$  — максимальная высота неровностей.

При определении контактных характеристик — относительной площади контакта  $\eta$  и плотности зазоров  $\Lambda$  — использовались выражения из работ [11–13]. На

рис. 4 представлены зависимости относительной площади контакта  $\eta$  от безразмерной нагрузки  $F_q$  при разных значениях температуры в зоне контакта шероховатых поверхностей.

Безразмерная нагрузка, или силовой упругогеометрический параметр  $F_q$  равен:

$$F_q = \frac{q_c a_c}{\omega R_{\max} E^*}, \quad (6)$$

где  $q_c$  — контактное давление в стыке;  $E^*$  — приведенный модуль упругости.

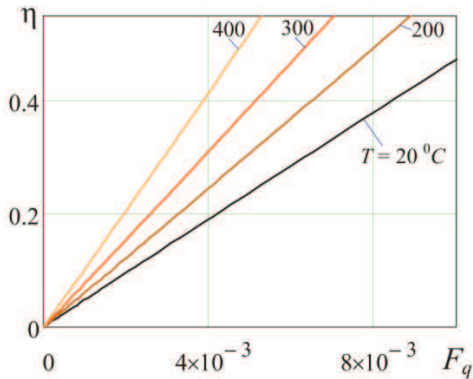


Рис. 4. Зависимости относительной площади контакта  $\eta$  от безразмерной нагрузки  $F_q$

На рис. 5 представлены зависимости плотности зазоров в уплотнительном стыке  $\Lambda$  от безразмерной нагрузки  $F_q$  при разных значениях температуры в зоне контакта шероховатых поверхностей.

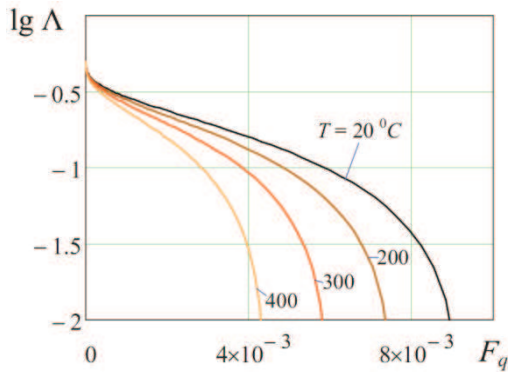


Рис. 5. Зависимости плотности зазоров в стыке  $\Lambda$  от безразмерной нагрузки  $F_q$

**Герметизирующая способность уплотнительного стыка** при упругопластическом контакте рассмотрена в работе [14]. Интенсивность объемного расхода (расхода на единицу длины по периметру уплотнения) идеально сжимаемого газа через уплотнительный стык при равномерном распределении контактных давлений  $q_c$ :

$$Q = C_u \cdot C_g, \quad (6)$$

где  $C_u$  — безразмерный функционал проницаемости, характеризующий герметизирующую способность стыка:

$$C_n(\epsilon_y, n, \epsilon) = \frac{(\Lambda(\epsilon_y, n, \epsilon))^3 \cdot K_f \cdot v_n(\epsilon_y, n, \epsilon)}{4(1 - \eta(\epsilon_y, n, \epsilon))^2}; \quad (7)$$

$$C_g = \frac{R_{\max}^3 RT}{l\mu} \int_{p_0}^{p_1} \frac{p dp}{RT} = \frac{R_{\max}^3 (p_1^2 - p_0^2)}{2l\mu}; \quad (8)$$

$p_1$  — давление среды;  $p$  — атмосферное давление;  $\mu$  — динамическая вязкость среды;  $l$  — ширина зоны уплотнения;  $v_n$  — доля эффективных микроканалов.

Выражение (8) содержит параметры, являющиеся исходными при расчетах величины утечки, и получено в предположении, что состояние описывается уравнением Клапейрона–Менделеева. При давлениях свыше 16 МПа при расчетах утечки следует использовать модель реального газа [4].

Доля эффективных микроканалов [14]:

$$v_n(\epsilon_y, n, \epsilon) = \begin{cases} (1 - x^*), & x^* < 1/3; \\ 3^{n-1} (1 - x^*)^n, & x^* \geq 1/3; \end{cases} \quad (9)$$

где  $n$  — число рядов микронеровностей по ширине зоны уплотнения.

$$x^*(\epsilon_y, n, \epsilon) = \int_0^{\epsilon} x_i^*(\epsilon_y, n, \epsilon, u) \phi'(u) du, \quad (10)$$

где:

$$x_i^*(\epsilon_y, n, \epsilon, u) = \begin{cases} 0, & \eta_i(\epsilon_y, n, \epsilon, u) < \eta_i^*; \\ 1, & \eta_i(\epsilon_y, n, \epsilon, u) \geq \eta_i^*; \end{cases} \quad (11)$$

$\eta_i^* = 0,5 \dots 0,55$  — критическое значение  $\eta_i$ .

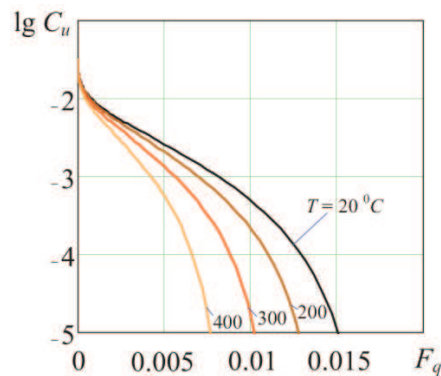


Рис. 6. Зависимости функционала проницаемости  $C_u$  от безразмерной нагрузки  $F_q$

На рис. 6 представлены зависимости функционала проницаемости  $C_u$  от безразмерной нагрузки  $F_q$  при разных значениях температуры в зоне контакта шероховатых поверхностей.

**Уравнение состояния газа.** Выражение (8) было получено в предположении, что состояние газа описывается уравнением Клапейрона–Менделеева. Однако ситуация меняется, когда давление доходит до 16 МПа и выше [4]. В этих случаях при разработке математиче-

ских моделей вводят реальный газ, и принципиальным отличием от идеального является наличие сил внутреннего трения. Чем выше плотность реального газа, тем больше он отличается от идеального. Для более точного описания реальных газов следует использовать уравнение состояния в вириальной форме [20]:

$$p = \rho RT \left[ 1 + \sum_{i=1}^r \sum_{j=0}^s b_{ij} \left( \frac{\rho}{\rho_{кр}} \right)^i \left( \frac{T_{кр}}{T} \right)^j \right], \quad (12)$$

где для азота  $T_{кр} = 126,2^\circ K$ ,  $\rho_{кр} = 313,1 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $R = 296,8 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot ^\circ K$ ,  $r = 10$ ,  $s = 7$ . Значения констант  $b_{ij}$ , определенных по экспериментальным данным для диапазона температур  $T = 63,1 \dots 1500^\circ K$  и давлений  $p = 0,1 \dots 100 \text{ МПа}$ , приведены в работе [20].

Согласно работе [21] уравнение состояния может быть записано следующим образом:

$$p = \rho RT \left[ 1 + B^* b_0 \rho + C^* (b_0 \rho)^2 + D^* (b_0 \rho)^3 + E^* (b_0 \rho)^4 \right]; \quad (13)$$

$$B^* = \sum_{i=0}^9 a_i (T^*)^{-i}, C^* = \sum_{i=0}^7 c_i (T^*)^{-i}, \quad (14a)$$

$$D^* = \sum_{i=0}^8 d_i (T^*)^{-i}, E^* = \sum_{i=0}^8 e_i (T^*)^{-i}, \quad (14б)$$

$$T^* = T / (\epsilon/k);$$

где  $B^*$ ,  $C^*$ ,  $D^*$ ,  $E^*$  — приведенные вириальные коэффициенты;  $\epsilon/k$  и  $b_0$  — величины, связанные с параметрами потенциальной функции. Для азота  $b_0 = 0,0022 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $\epsilon/k = 96,186^\circ K$ . Константы аппроксимации  $a_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$ ,  $e_i$  приведены в [21].

На рис. 7 приведены зависимости плотности азота от давления при температурах 20, 200, 300 и 400 °С.

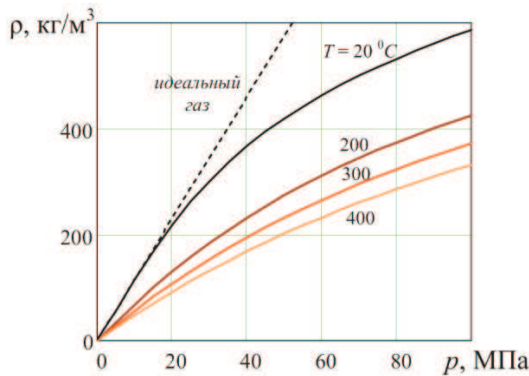


Рис. 7. Зависимости плотности азота от давления при разных температурах

Уравнение вязкости при высоких давлениях [20]:

$$\mu = \mu_0 \left[ 1 + B_\eta^* b_0 \rho + C_\eta^* (b_0 \rho)^2 \right], \quad (15)$$

где  $\eta_0$  — вязкость газа при низкой плотности.

Второй и третий вязкостные вириальные коэффициенты аппроксимированы полиномами:

$$B_\eta^* = \sum_{i=0}^8 k_i (T^*)^{-i}, C_\eta^* = \sum_{i=0}^8 l_i (T^*)^{-i}. \quad (16)$$

Константы аппроксимации для азота приведены в [20].

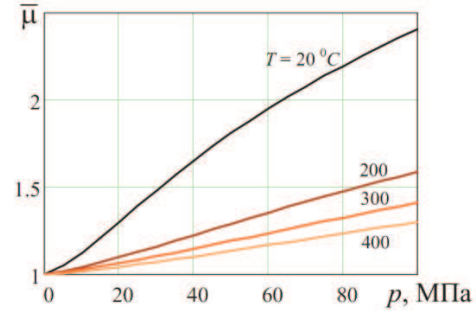


Рис. 8. Зависимости относительной вязкости азота от давления при разных температурах

На рис. 8 приведены зависимости вязкости азота от давления при температурах 20, 200, 300 и 400 °С. На рис. 9 — зависимости вязкости от температуры при давлениях 10, 40, 70 и 100 МПа.

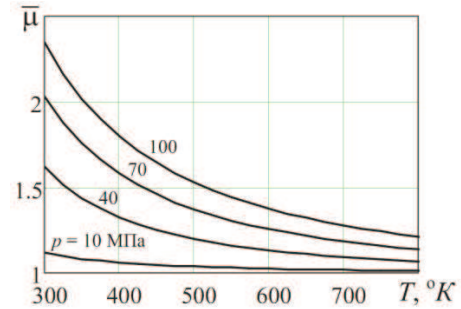


Рис. 9. Зависимости относительной вязкости азота от давления при разных температурах

Как следует из рис. 5, для температуры  $T = 20^\circ C$  при давлениях свыше 16 МПа следует учитывать свойства реальных газов. С этой целью воспользуемся, например, выражениями (13) и (14). Обозначим:  $b_0 \rho = X$ ;  $\bar{p} = p / p_0$ . Тогда:

$$\frac{\bar{p} p_0 b}{RT} = X + B^* (T^*) X^2 + C^* (T^*) X^3 + D^* (T^*) X^4 + E^* (T^*) X^5. \quad (17)$$

Учитывая, что  $R = 296,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ , а для азота

$$b_0 = 0,0022 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}, \quad \epsilon/k = 96,186^\circ K, \quad \text{имеем:}$$

$$0,007706 \frac{\bar{p}}{T^*} = X + B^* (T^*) X^2 + C^* (T^*) X^3 + D^* (T^*) X^4 + E^* (T^*) X^5. \quad (18)$$

В результате решения выражения (18) получим зависимость в виде  $X = X(\bar{p}, T^*)$ , или, учитывая, что  $T^* = T/(\epsilon/K)$ , в виде  $X = X(\bar{p}, T)$ .

Обозначим  $\bar{\rho} = \rho/\rho_0$ , где  $\rho$  и  $\rho_0$  — соответственно плотности азота при давлениях  $p$  и  $p_0$ . Тогда:

$$\rho = \rho_0 \bar{\rho}, \quad \bar{\rho}(\bar{p}, T) = \frac{\rho(\bar{p}, T)}{\rho(1, T)} = \frac{X(\bar{p}, T)}{X(1, T)}; \quad (19)$$

$$\rho = \frac{p_0}{RT} \frac{X(\bar{p}, T)}{X(1, T)}. \quad (20)$$

Аналогично выражению (8) имеем:

$$C_g = \frac{R_{\max}^3 p_0^2}{l\mu_0} \times \frac{1}{X(1, T)} \int_1^{\bar{p}_1} \frac{X(\bar{p}, T)}{1 + B_\mu X(\bar{p}, T) + C_\mu X^2(\bar{p}, T)} d\bar{p}, \quad (21)$$

или:

$$C_g = \frac{R_{\max}^3 p_0^2}{l\mu_0} I_{\bar{p}}, \quad (22)$$

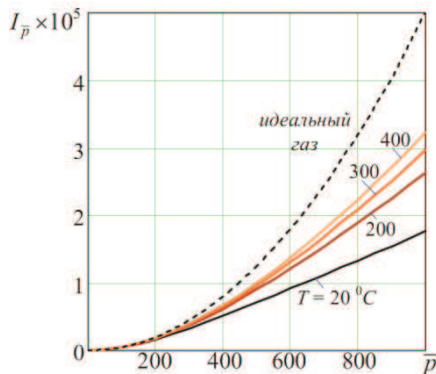
где:

$$I_{\bar{p}} = \frac{1}{X(1, T)} \int_1^{\bar{p}_1} \frac{X(\bar{p}, T)}{1 + B_\mu X(\bar{p}, T) + C_\mu X^2(\bar{p}, T)} d\bar{p}. \quad (23)$$

Следует отметить, что значение  $I_{\bar{p}}$  получено в безразмерном виде.

Зависимости  $I_{\bar{p}}(\bar{p}, T)$  для азота и температур 20, 200, 300 и 400 °C представлены на рис. 10. Там же представлена аналогичная зависимость для идеального газа, которая для всех указанных температур одинакова.

Как следует из рис. 10, расхождения между значениями  $I_{\bar{p}}$  для моделей реального и идеального газов для указанных температур при давлении  $p \approx 100$  МПа соответственно составляют 180, 128, 111 и 97 %. При этом с ростом температуры погрешность уменьшается, т. е. состояние газа становится ближе к идеальному.



**Рис. 10.** Зависимости  $I_{\bar{p}}(\bar{p}, T)$  от относительного давления при разных температурах

Для обеспечения заданной герметичности (величины  $Q$ ) из выражения (2) с учетом исходных данных, входящих в выражение (22), определяют требуемое значение функционала проницаемости  $C_u$ . Затем по зависимостям (рис. 4) определяют значение безразмерной нагрузки  $F_q$  и, с учетом выражения (6), контактные давления герметизации  $q_c$ . Предложенная методика позволяет рассчитать герметичность и определить контактные давления герметизации для соединений с высокими энергетическими параметрами.

### Заключение

1. С использованием дискретной модели шероховатости получены выражения для определения относительной площади контакта, плотности зазоров в стыке и функционала проницаемости. При этом учтены суммарное увеличение объема зазоров за счет упругого продавливания материала и суммарное уменьшение объема зазоров за счет пластического выдавливания материала для всех контактирующих неровностей.

2. Для обеспечения одинаковых значений относительной площади контакта, плотности зазоров в стыке и функционала проницаемости при росте температуры в зоне контакта с 20 °C до 400 °C требуется относительная безразмерная нагрузка  $F_q$  примерно в два раза меньше.

3. Уменьшение указанных параметров с ростом температуры в зоне контакта до 200 °C происходит за счет уменьшения экспоненты упрочнения  $n$ . С дальнейшим ростом температуры до 400 °C уменьшение указанных параметров происходит за счет резкого уменьшения  $\epsilon_y$ .

4. При давлениях свыше 16 МПа необходимо использование модели реального газа, состояние которого описывается уравнением в вириальной форме. При этом следует отметить, что с ростом температуры диапазон применения модели идеального газа увеличивается.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, в рамках госзадания № 2014/10 (проект № 1754) на 2016 г.

### Литература

- Огар П.М., Корсак И.И. Влияние характеристик тяжело нагруженного стыка шероховатых уплотнительных поверхностей на герметичность. Братск: БрИИ, 1989. 110 с. Деп. в ВИНТИ 05.12.1990, № 6109-В90.
- Долотов А.М., Огар П.М., Чегодаев Д.Е. Основы теории и проектирование уплотнений пневмогидроарматуры летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2000. 296 с.
- Огар П.М., Шеремета Р.Н., Лхангаг Д. Герметичность металлополимерных стыков шероховатых поверхностей. Братск: Изд-во БрГУ, 2006. 159 с.
- Огар П.М., Тарасов В.А. Проектирование затворов специальной трубопроводной арматуры. Братск: Изд-во БрГУ, 2014. 191 с.
- Ланков А.А. Вероятность упругих и пластических деформаций при сжатии металлических шероховатых поверхностей // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 3. С. 3-5.

6. Огар П.М., Дейнеко А.А., Щур Д.Д. Контакт жесткой сферической неровности с упругопластическим полупространством // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 4. С. 17-19.
7. Огар П.М., Тарасов В.А., Дайнеко А.А. О некоторых общих закономерностях упругопластического внедрения сферического индентора // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 8. С. 38-43.
8. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Развитие инженерных расчетов характеристик контакта жесткой сферы с упругопластическим полупространством // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 1. С. 80-87.
9. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Описание взаимодействия жесткой сферы с упругопластическим полупространством // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 163-169.
10. Огар P.M. Tarasov V.A. Kinetic indentation application to determine contact characteristics of sphere and elastoplastic half-space // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 664 (2013). P. 625-631.
11. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Контактное взаимодействие жесткой шероховатой поверхности через слой упругопластического покрытия // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3. С. 42-45.
12. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Трибомеханика упругопластического контакта // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 2. С. 116-122.
13. Огар П.М., Горохов Д.Б., Турченко А.В. Механика контактирования шероховатых поверхностей. Братск: Изд-во БрГУ, 2016. 282 с.
14. Алпатов Ю.Н., Тарасов В.А., Турченко А.В. Влияние характеристик упрочняемого материала на герметизирующую способность соединений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2 (34). С. 83-88.
15. Огар П.М., Горохов Д.Б., Ключев Е.А. Герметизирующая способность стыка фрактальных шероховатых поверхностей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2007. № 2 (14). С. 63-65.
16. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Герметизирующая способность тяжело нагруженных уплотнительных стыков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3 (23). С. 136-142.
17. Огар П.М., Горохов Д.Б. Определение параметров упругопластического тела для расчетов характеристик контакта при вдавливании сферы // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 1 (29). С. 28-32.
18. Young Modulus of Elasticity for Metals and Alloys [Электронный ресурс]. URL [http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d\\_773.html](http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_773.html) (дата обращения: 10.10.2015).
19. Karditis P., Baptiste M.-J. Thermal and structural properties of fusion related material. [Электронный ресурс]. URL <http://www-ferp.ucsd.edu/LIB/PROPS/PANOS/ss.html> (дата обращения: 11.10.2015).
20. Сычев В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д. Термодинамические свойства азота. М.: Изд-во стандартов, 1977. 277 с.
21. Зубарев В.Н., Козлов А.Д., Кузнецов В.М. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1989. 232 с.
1. Огар P. M., Korsak I.I., The influence of the heavy-laden interface of rough surfaces characteristics on leaktightness. – Bratsk: BrGI, 1989. 110 p. Dep. in VINITI, № 6109-V89.
2. Dolotov A.M., Ogar P.M., Chegodayev D.E. Fundamentals of the theory and design of seals pneumohydraulic valves of flying machines. M.: Izd-vo MAI, 2000. 296 p.
3. Ogar P.M., Sheremeta R.N., Lhanag D. The tightness of metal-polymeric joints of roughness surfaces. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2006. 159 p.
4. Ogar P.M., Tarasov V.A. Design closures special pipeline valves. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2014. 191 p.
5. Lankov A.A. Probability of elastic and plastic deformations while compressing metal rough surfaces // Treniye i smazka v mashinakh i mekhanizmakh. 2009. № 3. P. 3-5.
6. Ogar P.M., Daineko A.A., Shchur D.D. Contact of a rigid spherical asperity and elastoplastic half-space // Systems. Methods. Technologies. 2009. № 4. P. 17-19
7. Ogar P.M., Tarasov V.A., Daineko A.A. On some general regularities of a spherical indenter elastoplastic indentation // Systems. Methods. Technologies. 2010. № 8. P. 38-43
8. Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchenko A.V. The development of engineering design of specifications of contact rigid sphere with elastic-plastic half space // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2012. № 1(23). P. 80–87.
9. Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchenko A.V. Description of the contact of a rigid sphere and elastoplastic half-space // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki. 2012. V. 1. P. 163-169.
10. Ogar P.M. Tarasov V.A. Kinetic indentation application to determine contact characteristics of sphere and elastoplastic half-space // Advanced Materials Research. Vol.664 (2013). pp.625-631.
11. Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchenko A.V. Contacting rigid rough surface through a layer of elastic-plastic coatings // Modern technologies. System analysis. Modeling. . 2012. № 3. P. 42-45.
12. Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchenko A.V. Tribomechanics of elastoplastic contact // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2013. № 2. P. 116-122.
13. Ogar P.M., Gorokhov D.B., Turchenko A.V. Contact mechanics of rough surfaces. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2016. 282 p.
14. Alpatov Yu.N., Tarasov V.A., Turchenko A.V. Impact of the hardenable material characteristics on the joints sealing property // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2012. № 2. P. 83-88.
15. Ogar P.M., Gorokhov D.B., Klyuchev E.A. Sealing ability of the fractal rough surfaces joint // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2007. № 14. C. 63-65.
16. Ogar P.M., Tarasov B.A., Turchenko A.V. Sealing ability of heavy loaded sealing joints // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2009. № 3. C. 136-142.
17. Ogar P.M., Gorokhov D.B. Parameters for elastic-plastic body to calculate contact characteristics under the sphere indentation // Systems. Methods. Technologies. 2016. № 1 (29). P. 28-32.
18. Young Modulus of Elasticity for Metals and Alloys [Electronic resource] URL [http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d\\_773.html](http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_773.html) (date of the application: 10.10.2015).
19. Karditis P., Baptiste M.-J. Thermal and structural properties of fusion related material. [Electronic resource] URL <http://www-ferp.ucsd.edu/LIB/PROPS/PANOS/ss.html> (date of the application: 11.10.2015).
20. The thermodynamic properties of nitrogen / Sychev V. V., Vasserman A.A ., Kozlov A. D. and at. M.: Izd-vo standartov, 1977. 277 p.
21. Zubarev V. N., Kozlov A. D., Kuznetsov V. M. Thermophysical properties of technically important gases at high temperatures and pressures. Directory. M.: Energoatomizdat, 1989. 232 c.

## References