

УДК 620.165:29.620.79.1

DOI 10.18698/0536-1044-2018-1-12-18

Расчет параметров герметологических цепей

В.А. Макаров¹, А.В. Макаров¹, Р.Е. Тютяев²

¹ Московский технологический университет, 119454, Москва, Российская Федерация, пр-т Вернадского, д. 78

² Группа компаний «Русский свет», 111123, Москва, Российская Федерация, ш. Энтузиастов, д. 56, стр. 8

The Calculation of Hermetic Circuit Parameters

V.A. Makarov¹, A.V. Makarov¹, R.E. Tyutyayev²

¹ Moscow Technological University, 119454, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 78

³ Russkiy Svet Group of Companies, 111123, Moscow, Russian Federation, Shosse Entuziastov, Bldg. 56, Block 8

@ e-mail: himtest@mail.ru, Roman.Tyutyayev@gmail.com

i Процессы истечения газов в технике течеискания можно описать линейными уравнениями молекулярной модели истечения газов при контроле герметичности, что дает возможность проводить расчеты на основании законов и методов линейных электрических цепей. Процессы в рассматриваемых течах базируются на составлении компонентных и топологических уравнений. Компонентные уравнения, или уравнения ветвей, устанавливают связь между расходом и давлением в каждой ветви. Топологические уравнения, или уравнения узлов, выражены законами Кирхгофа. Согласно первому закону Кирхгофа, алгебраическая сумма молекулярных расходов в любом узле равна нулю, согласно второму — алгебраическая сумма потенциалов (перепадов давлений) в любом замкнутом контуре равна нулю. С помощью этих уравнений, во-первых, можно определять допустимые утечки отдельных узлов и комплектующих изделия, что является необходимым условием при формулировании требований к контролю герметичности. Во-вторых, линейная модель позволяет вычислять параметры уплотнений, обеспечивающие требуемую степень герметичности. Выполнены расчеты допустимых утечек через уплотнения с использованием законов и методов теории линейных электрических цепей.

Ключевые слова: техника течеискания, молекулярная модель истечения, герметологическая цепь, общая негерметичность

i Gas leakage processes in leak detection can be described by linear equations of the molecular model of gas outflow during leakage control, which makes it possible to perform calculations using the laws and methods of linear electrical circuits. The processes in these leaks are based on a compilation of component and topological equations. The component, or branch equations, establish a relationship between flow and pressure in each branch. The topological, or nodal equations, are expressed by Kirchhoff's laws. According to Kirchhoff's first law, the algebraic sum of molecular flow rates at any node is zero; according to the second law, the algebraic sum of potentials (pressure drops) in any closed loop is zero. With the help of these calculations, it is possible, firstly, to determine permissible leaks in individual units and components of the product, which is a prerequisite for formulating the requirements for leakage control. Secondly, the linear model makes it possible to determine the parameters of the seals that ensure the required degree of tightness. Permissible leaks through the seals are calculated using the laws and methods of the theory of linear electric circuits.

Keywords: leak detection techniques, molecular flow model, hermetic chain, total leakage

Наиболее целесообразным в технике течеискания является описание процессов истечения газов с помощью молекулярной электрогидравлической аналогии [1]. Во-первых, показания, выраженные в единицах молекулярной модели, не зависят от состава газа. Во-вторых, сопротивления при малых утечках и, соответственно, небольших изменениях плотности газовой среды линейны. Так, при утечке газа, вызывающей изменение испытательного давления 50 Па в диапазоне давлений 0,04...0,2 МПа, сжимаемость струи, равная относительному изменению плотности, составляет 0,069...0,0021 %.

На рис. 1 приведена зависимость модуля объемного сжатия ξ газовой среды (воздуха) от изменения давления Δp при различных значениях давления испытания p_n , вызванного утечкой газа. Учитывая, что сжимаемость газовой среды для области перепада давлений испытания до 0,1 МПа не превышает 5 %, можно считать, что сопротивления уплотнений не меняются.

Цель работы — определение расходов и сопротивлений в герметологических схемах контроля герметичности, основанное на применении методов теории расчета линейных электрических цепей [2] в диапазонах течей $10^{-5} \dots 10^2$ (м³·Па)/с и абсолютных давлений испытания 0,2...1,0 МПа, в основном применяемых для испытания изделий массового производства.

Процессы в рассматриваемых течах базируются на составлении компонентных и топологических уравнений [3]. Компонентные уравнения или уравнения ветвей, устанавливают связь между расходом и давлением в каждой ветви. Топологические уравнения, или уравнения узлов выражены законами Кирхгофа.

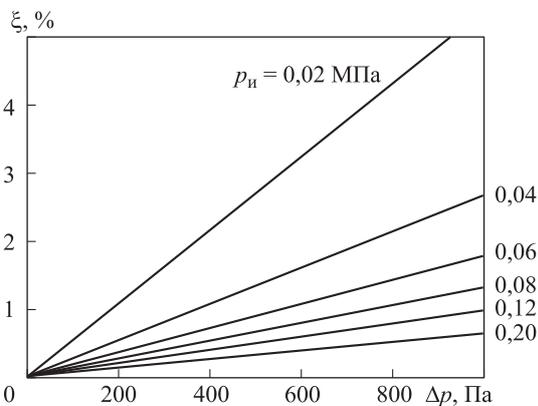


Рис. 1. Зависимость модуля объемного сжатия ξ газовой среды от изменения давления Δp при различных значениях давления испытания p_n

Первый закон Кирхгофа для цепей при контроле герметичности можно сформулировать следующим образом. Алгебраическая сумма молекулярных расходов в любом узле равна нулю:

$$\sum_i^n \frac{\partial N_i}{\partial t} = \sum_i^n Q_i = 0, \tag{1}$$

где i — номер ветви, подходящей к узлу; N_i и Q_i — количество молекул и молекулярный расход в i -м узле.

Второй закон Кирхгофа применительно к рассматриваемым цепям трактуется так. Алгебраическая сумма потенциалов (перепадов давлений) в любом замкнутом контуре равна нулю:

$$\sum_i^n p_i = 0, \tag{2}$$

где p_i — потенциал давления (при перепаде давлений используется величина Δp_i на i -м элементе контура, взятая с соответствующим знаком).

Решить уравнения (1) и (2) можно следующими методами, применяемыми в теории электрических цепей [4].

Метод расходов основан на составлении системы уравнений по законам Кирхгофа, приведенных для отдельных узлов и ветвей:

$$\begin{cases} \xi_1 Q_1 + \xi_2 Q_2 + \xi_3 Q_3 + \dots + \xi_{i-1} Q_{i-1} = Q_i; \\ z_1 p_1 + z_2 p_2 + z_3 p_3 + \dots + z_{i-1} p_{i-1} = p_i, \end{cases} \tag{3}$$

где ξ_1, \dots, ξ_{i-1} — коэффициенты в узловых уравнениях; z_1, \dots, z_{i-1} — импедансы ветвей.

Метод узловых потенциалов дает возможность определить значения молекулярных расходов в ветвях по узловым потенциалам (рис. 2):

$$\begin{cases} \alpha_1 (p_1 - p_0) + \alpha_2 (p_1 - p_0) + \dots + \\ + \alpha_m (p_1 - p_0) = Q_0; \\ \alpha_1 p_0 + \alpha_2 p_0 + \dots + \alpha_m p_0 = \\ = (\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_m) p_0 + Q_0, \end{cases} \tag{4}$$

где $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ — проводимости отдельных ветвей контрольной цепи.

Метод контурных расходов обеспечивает расчет по уравнениям (3) для набора независимых контуров, число которых меньше числа независимых узлов.

Расчет сложных цепей можно упростить с помощью эквивалентных схем преобразования (рис. 3).

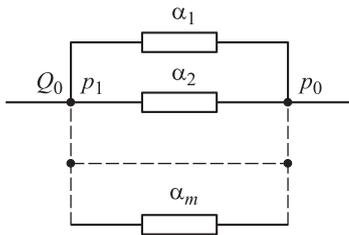


Рис. 2. Схема определения параметров с использованием метода узловых потенциалов

На рис. 3 и далее $\alpha_1(S), \alpha_2(S)$ — проводимости; $z_1(S), z_2(S)$ — импедансы сопротивления; S — преобразователь Лапласа.

При параллельном расположении уплотнений перепады давлений на них равны, а расходы суммируются:

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = \dots = \Delta p_n;$$

$$Q(S) = (p_1 - p_2) \sum_{i=1}^n \alpha_i(S). \quad (5)$$

При последовательном расположении уплотнений перепады давлений суммируются, а расходы равны:

$$\Delta p_1 + \Delta p_2 + \dots + \Delta p_n = p_1 - p_2;$$

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n;$$

$$\alpha(S) = \frac{Q(S)}{p_1 - p_2} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_i(S)}}. \quad (6)$$

Формулы (1)–(6) можно использовать для определения расходов и сопротивлений в герметологических схемах, входящих в состав сборочного изделия.

Определение расходов в герметологических схемах. Для изделий сложной формы, обладающих целой системой уплотнений, определенные суммарного параметра — общей негерметичности [5] — является недостаточным. Необходимо иметь математический аппарат, позволяющий рассчитать степени герметичности всех узлов, входящих в конструкцию изделия. Общую негерметичность, определяемую допустимым расходом в течение времени хранения, эксплуатации изделия [6], можно вычислить по параметрам контроля герметичности, заданным в технической документации, или по изменению параметров изделия в результате воздействия внешней среды.

Допустимые расходы для отдельных уплотнений, входящих в состав этого изделия, должны быть найдены, исходя из общей негерметичности для изделия в целом. Однако в технических требованиях по контролю герметичности это обстоятельство часто не учитывается. Например, в таблице приведены параметры контроля герметичности изделия (рис. 4) и для его отдельных уплотнений [7].

Анализ таблицы показывает, что логика в задании параметров контроля для отдельных уплотнений изделия отсутствует: допустимые расходы для его локальных стыков могут быть больше или меньше допустимого суммарного расхода. Несоблюдение взаимосвязи между общей или локальной негерметичностью приводит либо к появлению брака, либо к неоправданному усложнению и удорожанию процесса испытания. Некоторые источники [8] рекомендуют локальную степень негерметичности отдельных уплотнений изделия, характеризуемую допустимым расходом Q , определять по формуле

$$q = \frac{Q}{n}, \quad (7)$$

где q — допустимый расход для отдельного уплотнения; n — количество стыков изделия, проверяемых на герметичность.

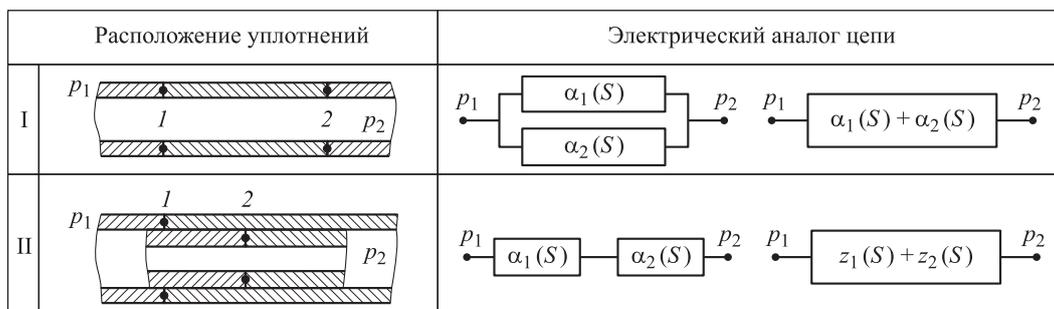


Рис. 3. Эквивалентные схемы преобразования при параллельном (I) и последовательном (II) расположении уплотнений: 1 — параллельное; 2 — последовательное

Параметры контроля герметичности изделия и его отдельных уплотнений

Параметр	Изделие	Уплотнение		
		1	2	3
Испытательное давление p , МПа	0,08	0,09	0,08	0,02
Допустимый спад Δp , Па	250	200	300	150
Время контроля, с	20	30	30	60
Допустимый поток Π , (Па·м ³)/с	0,279	0,061	0,334	0,007

Следует отметить, что формула (7) не учитывает расположение уплотнений изделия при испытании его под газовой нагрузкой, которые могут быть размещены как последовательно, так и параллельно относительно источника нагрузки. Подобно линейной электрической цепи, схему контроля герметичности можно представить рядом последовательно, параллельно или смешанно соединенных сопротивлений, в качестве которых выступают гидравлические сопротивления уплотнений. Для пояснения составления подобных схем на рис. 4 представлена схема уплотнений изделия и ее электрический аналог.

Основываясь на перечисленных методах анализа линейной цепи, можно рассчитать параметры этой схемы:

$$Q_0 = \frac{p_0}{R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{\frac{1}{R_4 + R_6} + \frac{1}{R_5 + R_7}}}}};$$

$$Q_0 = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5;$$

$$p_1 = p_0 - Q_0 R_1;$$

$$p_2 = p_1 - Q_5 R_5,$$

где Q_0, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 — молекулярные расходы в соответствующих ветвях схемы; R_1, \dots, R_7 — гидравлические сопротивления уплотнений; p_0, p_1, p_2 — давления в соответствующих ветвях схемы.

Например, допустимая суммарная утечка Π для рассматриваемого изделия составляет 10^{-4} (м³·Па)/с, что соответствует молекулярному расходу при нормальных условиях $2,5 \cdot 10^{16}$ с⁻¹.

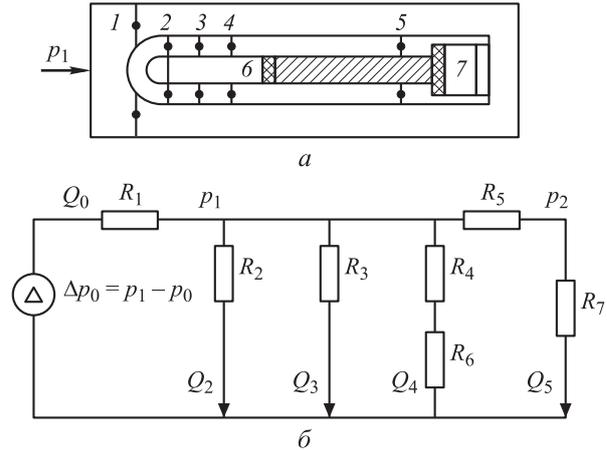


Рис. 4. Схема для определения технических требований к герметичности изделия (а) и ее электрический аналог (б)

Испытания проводились при давлении $p_0 = 0,5 \cdot 10^6$ Па. Общее сопротивление цепи

$$\sum_1^n R = \frac{p_0}{Q_0}.$$

Полагая, что сопротивления одинаковы, можно определить молекулярные расходы в ветвях, т. е. $Q_2 = Q_3 = Q_4 = Q_5 = Q_0/4 = 6 \cdot 10^{15}$ с⁻¹, что соответствует допустимой утечке $0,25 \cdot 10^{-4}$ (м³·Па)/с. Испытательное давление $p_1 = Q_5(R_5 + R_7) = 0,125 \cdot 10^{17} R$. Из формулы $p_1 = p_0 - Q_0 R_1$ определим $R_1 = 1,33 \cdot 10^{-11}$ Па·с. Тогда $p_1 = 0,16 \cdot 10^6$ Па, а $p_2 = p_1 - Q_5 R_5 = 0,08 \cdot 10^6$ Па.

Таким образом, с помощью проведенного расчета найдены допустимые молекулярные расходы для всех уплотнений, и результаты расчетов могут быть использованы для задания технических требований при испытании на герметичность комплектующих изделий.

Расчет сопротивлений. Для расчета уплотнений сначала необходимо найти значения допустимых расходов и сопротивлений, входящих в состав схемы изделия. Затем на основании полученных данных, используя зависимости между допустимыми утечками и сопротивлениями [9], можно определить конструктивные параметры уплотнений.

В качестве примера рассмотрим испытательную схему (рис. 5), состоящую из ряда соединенных сопротивлений, представляющих собой гидравлические уплотнения.

Согласно второму закону Кирхгофа, можно записать

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5 = Q_6;$$

$$Q_1 = Q_2 = \frac{Q_0}{2};$$

$$Q_3 = Q_4 = Q_5 = \frac{Q_0}{3};$$

$$Q_6 = Q_0.$$

С учетом того, что сопротивления схемы равны, можно сделать вывод, что в каждом контуре давление будет составлять 1/3 от общего давления. Рассмотрим первый контур схемы, состоящий из сопротивлений R_1 и R_2 , и определим соотношение между давлением p и молекулярным расходом Q_0 :

$$\frac{p}{3} = \frac{Q_0}{2} R_1 + \frac{Q_0}{2} R_2 = \frac{Q_0}{2} (R_1 + R_2) = \frac{Q_0}{2} R_{1,2};$$

$$R_{1,2} = \frac{2p}{3Q_0}, \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Эквивалентное сопротивление цепи R_3 , состоящей из n параллельно соединенных сопротивлений, определяется из выражения

$$\frac{1}{R_3} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}.$$

В частном случае параллельное соединение двух сопротивлений R_1 и R_2 вычисляется по формуле

$$R_{1,2} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R^2}{2R} = \frac{R}{2};$$

$$R = 2R_{1,2}, \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Рассмотрим второй контур замкнутой цепи, состоящий из сопротивлений R_3, R_4, R_5 :

$$\frac{p}{3} = \frac{Q_0}{3} R_3 + \frac{Q_0}{3} R_4 + \frac{Q_0}{3} R_5 =$$

$$= \frac{Q_0}{3} (R_3 + R_4 + R_5) = \frac{Q_0}{3} R_{3,4,5};$$

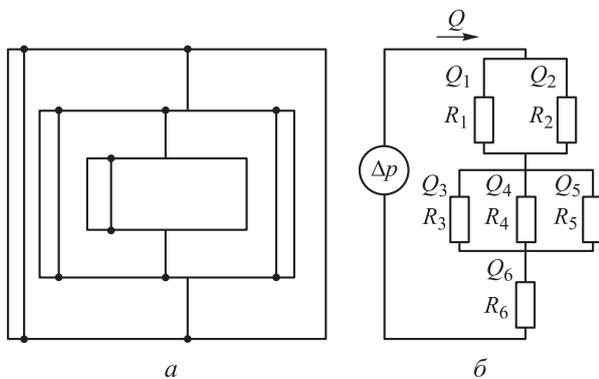


Рис. 5. Схема для расчета параметров уплотнений (а) и ее электрический аналог (б)

$$R_{3,4,5} = \frac{3p}{3Q_0};$$

$$R_{3,4,5} = \frac{R_3 R_4 R_5}{R_3 R_4 + R_4 R_5 + R_5 R_3} = \frac{R^3}{3R^2} = \frac{R}{3};$$

$$R = 3R_{3,4,5}, \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Эквивалентное сопротивление цепи R_3 , представляющей собой одноконтурную модель (рис. 6), рассчитывается по выражению

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4 R_5}{R_3 R_4 + R_4 R_5 + R_5 R_3} + R_6, \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Рассмотрим конкретное уплотнение для неподвижного соединения (рис. 7), выполненного в виде эластомерного кольца.

Известно [10], что расход через подобное сопротивление зависит от контактного давления p_k на эластомерное уплотнение, шероховатости контактируемых поверхностей Rz и других конструктивных и технологических параметров:

$$Q = \psi_0 \frac{B \Delta p}{l \mu} (Rz)^3 e^{-\frac{3p_k}{KE}},$$

где ψ_0 — коэффициент диффузионной проницаемости среды [11]; B — характерная ширина микроканалов, мкм; l — характерная длина микроканалов, мкм; μ — коэффициент динамической вязкости; Rz — шероховатость пазов

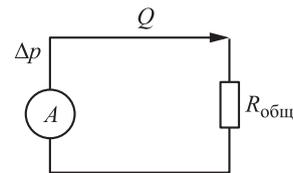


Рис. 6. Одноконтурная модель цепи

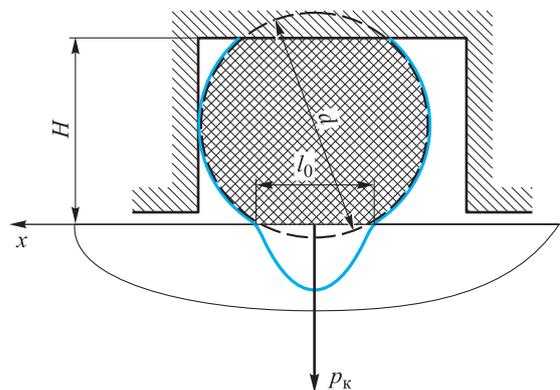


Рис. 7. Схема уплотнения с использованием эластомерного кольца

стыка, мкм; E — модуль упругости для резин, Па; K — коэффициент, зависящий от качества обработанной поверхности.

Для подобных уплотнений контактное давление

$$p_k = \ln \left(\frac{l\mu}{(Rz)^3 R_{1,2} B \Psi_0} \right) KE.$$

Значение p_k должно удовлетворять условию $1,5 \text{ МПа} < p_k < 3,0 \text{ МПа}$.

При установке кольца диаметром d в посадочное место высотой H на уплотняемых поверхностях шириной l_0 возникает начальное контактное давление $p_{к.з}$, характеризующее степень сжатия ε и модулем упругости E [12]:

$$p_{к.з} = E\varepsilon K.$$

Вычисляем степень сжатия по формуле

$$\varepsilon = \frac{p_{к.з}}{EK}.$$

Литература

- [1] Макаров В.А., Панов А.А. Герметологический синтез уплотнительных систем. *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. Сб. тр. II Междунар. науч. конф.*, Москва, 14–15 октября 2012 г., ИМАШ РАН, Москва, Спектр, 2012, с. 107–115.
- [2] Бессонов Л.А. *Теоретические основы электротехники. Электрические цепи*. Москва, Гардарики, 2007. 701 с.
- [3] Лукманов В.С. *Теоретические основы электротехники. Ч. I. Теория линейных электрических цепей*. Уфа, УГАТУ, 2005. 120 с.
- [4] Атабеков Г.И. *Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи*. Москва, Лань, 2009. 360 с.
- [5] Клюев В.В., ред. *Неразрушающий контроль: справочник. Т. 2, кн. 1*. Москва, Машиностроение, 2003, 688 с.
- [6] ГОСТ 24054–80. *Изделия машиностроения и приборостроения. Методы испытания на герметичность. Общие требования*. Москва, Росстандарт, 1987. 35 с.
- [7] Макаров В.А., Сажин С.Г., Фадеев М.А. Автоматизация контроля герметичности. *Методы повышения качества и надежности контроля герметичности. Сб. тез. докл. 3-й Всерос. конф.*, Дзержинск, Дзержинский филиал ГПИ, 1997, с. 53–55.
- [8] Альтшуль А.Д. *Гидравлические сопротивления*. Москва, Недра, 1970. 216 с.
- [9] Евлампиев А.И., Попов Е.Д., Сажин С.Г., Сумкин П.С. *Течеискание*. Москва, Спектр, 2011. 208 с.
- [10] Голубев А.И., Кондаков Л.А., ред. *Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник*. Москва, Машиностроение, 1986. 464 с.
- [11] Кикоин А.К., Кикоин И.К. *Молекулярная физика*. Москва, Наука, 1976. 480 с.
- [12] Bussemaker E.J. The development of floating ring type shaft seals for centrifugal compressors. *5th International Conference on Fluid Sealing*, England, BHRA, 1971, pp. 37–39.
- [13] Рейтлингер С.А. *Проницаемость полимерных материалов*. Москва, Химия, 1974. 271 с.

Зная степень сжатия ε и задавая диаметр эластомерного кольца $d = 7,5 \text{ мм}$, из выражения

$$\varepsilon = \frac{d - H}{d}$$

находим высоту канавки $H = 6,225 \text{ мм}$.

Таким образом, по полученным данным определены необходимые параметры эластомерного кольца [13]. Предложенную методику можно применять и для других видов уплотнений.

Выводы

1. Линейность характеристик процессов истечения газов при использовании молекулярной электрогидравлической аналогии позволила применить в технике течеискания законы и методы расчета теории линейных электрических цепей.

2. С помощью этих методов проведены расчеты допустимых утечек через уплотнения, а также параметров последних.

References

- [1] Makarov V.A., Panov A.A. Germetologicheskii sintez uplotnitel'nykh system [Hermetic synthesis of sealing systems]. *Fundamental'nye issledovaniia i innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii. Sb. tr. 2 Mezhdunar. nauch. konf.* [Fundamental research and innovative technologies in mechanical engineering. Proceedings of the 2nd International Scientific Conference]. Moscow, IMASh RAN-MIREA publ., 2015, pp. 155–164.
- [2] Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie tsepi* [Theoretical bases of electrical engineering. Electrical circuits]. Moscow, Gardariki publ., 2007. 701 p.
- [3] Lukmanov V.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Chast' I. Teoriia lineinykh elektricheskikh tsepei* [Theoretical bases of electrical engineering. Part I. Theory of linear electric circuits]. Ufa, USATU publ., 2005. 120 p.
- [4] Atabekov G.I. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Lineinye elektricheskie tsepi* [Theoretical bases of electrical engineering. Linear electrical circuits]. Moscow, Lan' publ., 2009. 360 p.
- [5] *Nerazrushaiushchii kontrol': spravochnik* [Non-destructive testing: a guide]. Ed. Kliuev V.V. Moscow, Mashinostroenie publ., 2003, vol. 2, b. 1. 688 p.
- [6] GOST 24054–80. *Izdeliia mashinostroeniia i priborostroeniia. Metody ispytaniia na germetichnost'. Obshchie trebovaniia* [State Standard 24054–80. Engineering and instrument production items. Leak detection methods. General requirements]. Moscow, Rosstandart publ., 1987. 35 p.
- [7] Makarov V.A., Sazhin S.G., Fadeev M.A. Avtomatizatsiia kontroliia germetichnosti [Automation of leak testing]. *Metody povysheniia kachestva i nadezhnosti kontroliia germetichnosti. Sb. tez. dokl. 3 Vseros. konf.* [Methods for improving the quality and reliability of leak testing. Proceedings of the 3rd All-Russian Conference]. Dzerzhinsk, Dzerzhinskii filial GPI publ., 1997, pp. 53–55.
- [8] Al'tshul' A.D. *Gidravlicheskie soprotivleniia* [Hydraulic resistance]. Moscow, Nedra publ., 1970. 216 p.
- [9] Evlampiev A.I., Popov E.D., Sazhin S.G., Sumkin P.S. *Techeiskanie* [Leak testing]. Moscow, Spektr publ., 2011. 208 p.
- [10] *Uplotneniia i uplotnitel'naia tekhnika: spravochnik* [Seals and sealing machinery: a guide]. Ed. Golubev A.I., Kondakov L.A. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986. 464 p.
- [11] Kikoin A.K., Kikoin I.K. *Molekuliarnaia fizika* [Molecular physics]. Moscow, Nauka publ., 1976. 480 p.
- [12] Bussemaker E.J. The development of floating ring type shaft seals for centrifugal compressors. *5th International Conference on Fluid Sealing*, England, BHRA, 1971, pp. 37–39.
- [13] Reitlinger S.A. *Pronitsaemost' polimernykh materialov* [Molecular physics]. Moscow, Khimiia publ., 1974. 271 p.

Статья поступила в редакцию 19.09.2017

Информация об авторах

МАКАРОВ Валерий Анатольевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная информатика». Московский технологический университет (119454, Москва, Российская Федерация, пр-т Вернадского, д. 78, e-mail: himtest@mail.ru).

МАКАРОВ Андрей Валерьевич (Москва) — аспирант кафедры «Промышленная информатика». Московский технологический университет (119454, Москва, Российская Федерация, пр-т Вернадского, д. 78, e-mail: himtest@mail.ru).

ТЮТЯЕВ Роман Евгеньевич (Москва) — руководитель направления по проектам электроэнергетической отрасли. Группа компаний «Русский свет» (111123, Москва, Российская Федерация, шоссе Энтузиастов, д. 56, стр. 8, e-mail: Roman.Tyutyayev@gmail.com).

Information about the authors

MAKAROV Valeriy Anatolievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Industrial Informatics. Moscow Technological University (119454, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 78, e-mail: himtest@mail.ru).

MAKAROV Andrey Valerievich (Moscow) — Postgraduate, Department of Industrial Informatics. Moscow Technological University (119454, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 78, e-mail: himtest@mail.ru).

TYUTYAEV Roman Evgenievich (Moscow) — Manager, Electric Power Industry Projects. Russkiy Svet Group of Companies (111123, Moscow, Russian Federation, Shosse Entuziastov, Bldg. 56, Block 8, e-mail: Roman.Tyutyayev@gmail.com).