

# Расчет и конструирование машин

УДК 620.165:29.620.79.1

DOI 10.18698/0536-1044-2017-12-3-10

## Анализ работы проточных элементов при контроле герметичности

**В.А. Макаров<sup>1</sup>, А.В. Макаров<sup>1</sup>, Р.Е. Тютяев<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Московский технологический университет, 119454, Москва, Российская Федерация, пр-т Вернадского, д. 78<sup>2</sup> Группа компаний «Русский свет», 111123, Москва, Российская Федерация, ш. Энтузиастов, д. 56, стр. 8

## An Analysis of the Operation of Flow Elements When Monitoring Leakage

**V.A. Makarov<sup>1</sup>, A.V. Makarov<sup>1</sup>, R.E. Tyutyayev<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Moscow Technological University, 119454, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 78<sup>2</sup> Russkiy Svet Group of Companies, 111123, Moscow, Russian Federation, Shosse Entuziastov, Bldg. 56, Block 8

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



Проведен анализ работы проточных элементов при контроле герметичности, состоящих из дросселей и камер постоянного и переменного объемов, при различных режимах течения газовых сред, используемых в течеискании: молекулярном, вязкостном, промежуточном (молекулярно-вязкостном) и диффузионном. На функционирование камер влияют как способы контроля, так и наличие в них эластичных оболочек. При контроле малых утечек и высокой чувствительности испытания процессы в камерах переменного объема создают ложное истечение, направленное на преодоление сил упругости, соизмеримое с полезным сигналом. В зависимости от силы упругости материала эластичных оболочек и давления испытания изменяются как статические, так и динамические параметры камер при их опустошении и заполнении. Приведены формулы и графики для определения сопротивлений, расходов и постоянных времени, необходимых для расчета переходных процессов испытательных схем с круглыми и щелевыми течами, применяемых для идентификации отверстий разгерметизации типа трещин и пор.

**Ключевые слова:** проточные элементы, молекулярный режим течения, диффузионный режим течения, упругий элемент, круглые течи, щелевые течи



This paper presents an analysis of the operation of flow elements consisting of throttles and constant and variable volume chambers when monitoring leakage at various gas flow regimes used in leak detection, such as the molecular, viscous, intermediate (molecular-viscous) and diffusion regimes. The operation of the chambers is affected by the methods of monitoring as well as the presence of elastic membranes in the chambers. When monitoring small leaks and conducting high sensitivity tests, the processes in the variable volume chambers create false leakage directed at overcoming the elastic forces commensurate with the useful signal. Depending on the elastic force of the elastic membrane material and the test pressure values, both the static and the dynamic parameters of the chambers change when they are emptied and filled. The article presents formulas and graphs for determining the resistances, consumption and time constants needed to calculate the transient processes

in test circuits with round and slotted leaks used to identify depressurization openings such as cracks and pores.

**Keywords:** flow elements, molecular flow regime, diffusion flow regimes, elastic element, round leaks, slot-hole leaks

К проточным элементам при контроле герметичности изделий относятся дроссели и камеры, аналогичные пневматическим схемам [1], применяемым в течеискании при различных режимах течения газовых сред: молекулярном, вязкостном, промежуточном (молекулярно-вязкостном) и диффузионном.

Цель работы — анализ переходных процессов, происходящих в испытательных схемах при контроле герметичности изделий массового и серийного производства в диапазонах утечек  $10^{-5} \dots 10^2$  (м<sup>3</sup>·Па)/с и абсолютных давлений испытания 0,2...1,0 МПа.

Эти процессы часто зависят от наличия в камерах эластичных оболочек: изделий или отдельных узлов, зажимных манжет для локализации стыков, чувствительных элементов и т. п. При контроле малых утечек и высокой чувствительности испытания процессы в камерах переменного объема создают ложное истечение, направленное на преодоление сил упругости, соизмеримое с полезным сигналом. В зависимости от силы упругости материала эластичных оболочек и давления испытания изменяются как статические, так и динамические параметры камер при их опустошении и заполнении.

Работу такой камеры в испытательных схемах при контроле герметичности можно проанализировать, исходя из уравнения основного газового закона [2] при переменных абсолютном давлении  $p$  и объеме  $V$ :

$$pV = NkT, \quad (1)$$

где  $N$  — количество молекул;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура.

В дифференциальной форме уравнение (1) имеет вид

$$p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} = kT \frac{dN}{dt}. \quad (2)$$

С учетом того, что изменения объема  $dV$  и давления  $dP$  связаны между собой постоянным объемным коэффициентом  $\xi_V$ , т. е.  $dV = \xi_V dp$  [3], а молекулярный расход  $Q = dN/dt$ , уравнение (2) можно представить следующим образом:

$$Q = \frac{\xi_V p_1}{kT} \frac{d(p_1 - p_2)}{dt} + \frac{V}{kT} \frac{dp_1}{dt}, \quad (3)$$

где  $p_1$ ,  $p_2$  — давление газа по обе стороны оболочки изделия.

В зависимости от способа контроля [4] и наличия эластичных оболочек в камерах уравнение (3) будет видоизменяться в соответствии с условиями испытания. При постоянном  $p_1$  и переменном  $p_2$  давлениях молекулярный расход

$$Q = \frac{\xi_V p_1}{kT} \frac{dp_2}{dt}. \quad (4)$$

Это уравнение описывает камерный способ контроля, когда изделие или его часть размещены в испытательной камере, и перепад давлений  $\Delta p = p_1 - p_2$  создается путем подачи испытательного давления внутрь изделия, а регистрация течи осуществляется по изменению давления в камере. При бескамерном способе контроля в случае переменного  $p_1$  и постоянного  $p_2$  давлений молекулярный расход

$$Q = \frac{\xi_V p_1 + V}{kT} \frac{dp_1}{dt}. \quad (5)$$

При нулевой жесткости оболочки ( $\xi_V = 0$ ) расход определяется известным дифференциальным уравнением камеры с постоянным объемом  $V$ :

$$Q = \frac{V}{kT} \frac{dp_1}{dt}. \quad (6)$$

Согласно работе [5], изменение количества молекул  $dN$  под действием изменения давления или его перепада представляет собой емкость  $C = dN/dp$ , которая в уравнениях (4)–(6) имеет вид

$$C_i = \begin{cases} \frac{\xi_V p_1}{kT}; \\ \frac{\xi_V p_1 + V}{kT}; \\ \frac{V}{kT}. \end{cases} \quad (7)$$

Определить значение объемного коэффициента  $\xi_V$  можно по формулам [6], приведенным в табл. 1, для чувствительных элементов, изделий

и узла герметизации, наиболее часто используемых в испытательных установках. В табл. 1 приведены следующие условные обозначения:  $r_{мм}$ ,  $r_{сф}$ ,  $r_{пж}$ ,  $r_{и}$  — радиус эффективной площади соответственно мембраны, сальфона, пружины, изделия;  $E_y$  — модуль упругости;  $\eta_{п}$  — коэффициент Пуассона;  $C_{мм}$ ,  $C_{сф}$ ,  $C_{пж}$ ,  $C_{и}$  — толщина материала соответственно мембраны, сальфона, пружины, манжеты изделия;  $n_r$  — число гофр сальфона;  $A_0, B_0, \Gamma_0, D_0$  — геометрические параметры;  $\varepsilon$  — относительное удлинение средней линии манжеты.

Зная значения объемного коэффициента  $\xi_V$ , можно рассчитать емкость  $C_i$ , используя уравнения (7). Совместное решение одного из уравнений (4)–(6) и выражения  $Q = (p_1 - p_2)/R_i$  ( $R_i$  — сопротивление течи) позволяет определить временную характеристику изменения перепада давления  $\Delta p = f(t)$ :

$$Q = \frac{p_1 - p_2}{R_i} = C_i \frac{dp}{dt};$$

$$\frac{d(p_1 - p_2)}{p_1 - p_2} = \left| \frac{1}{R_i C_i} \right| dt$$

или

$$\Delta p = \Delta p_0 (1 - e^{-t/\tau_i}), \tag{8}$$

где  $\Delta p_0$  — начальный перепад давления;  $\tau_i$  — постоянная времени,  $\tau_i = R_i C_i$ .

Таблица 1

Расчетные формулы для определения объемного коэффициента  $\xi_V$

Тип упругого элемента	Объемный коэффициент $\xi_V$
Чувствительный элемент:	
плоская мембрана	$0,2 \frac{r_{мм}^6}{E_y C_{мм}^3} (1 - \eta_{п}^2)$
сальфон	$2 \frac{n_r r_{сф}^4}{E_y C_{сф}^3} (1 - \eta_{п}^2) A_0$
манометрическая пружина	$12 \frac{r_{пж}^6}{E_y C_{пж}^6} (1 - \eta_{п}^2) B_0$
Узел герметизации — зажимная манжета	$\frac{r_{мм}}{E_y C_{мм} \varepsilon} B_0$
Изделие из тонкостенной металлической оболочки:	
сфера	$\frac{r_{и}}{E_y C_{и}} (1 - \eta_{п}) \Gamma_0$
цилиндр	$\frac{r_{и}^2}{E_y C_{и}} \left( 1 - \frac{\eta_{п}}{2} \right) D_0$

Сопротивление  $R_i$  рассчитывают по формулам расхода газа для различных режимов течения, регистрируемых при контроле герметичности. Для молекулярного расхода [7] сопротивление течи в тонкой стенке

$$R_i = \frac{kT}{S_T \nu}, \text{ Па}\cdot\text{с}, \tag{9}$$

где  $S_T$  — площадь дефекта;  $\nu$  — скорость распространения волны сжатия.

Из формулы (9) следует, что сопротивление  $R_i$  прямо пропорционально вероятной энергии молекулы  $kT$ , обратно пропорционально площади дефекта  $S_T$  и скорости распространения волны сжатия  $\nu$ .

**В молекулярном режиме течения газов** для определения влияния длины дефекта (течи)  $l$  на сопротивление воспользуемся формулой расчета молярного расхода течи, которая в этом случае имеет вид [8]

$$Q_M = \frac{8\pi}{3} \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu R_y T}} \frac{r^3}{l} (p_1 - p_2), \text{ моль/с}, \tag{10}$$

где  $\mu$  — относительная молекулярная масса;  $R_y$  — универсальная газовая постоянная;  $r$  — радиус дефекта.

Умножая правую часть уравнения (10) на число Авогадро  $N_A$  и учитывая, что масса молекулы  $m = \mu/N_A$  и  $k = R_y/N_A$  [9], получим

$$Q_M = \frac{r S_T}{l} \frac{1}{\sqrt{mkT}} (p_1 - p_2)$$

или

$$Q_M = \frac{r S_T}{l} \left( \frac{kT}{m} \right)^{1/2} (n_1 - n_2), \text{ с}^{-1},$$

где  $n_1 - n_2$  — перепад молекулярных плотностей на течи.

Сопротивление молекулярному расходу

$$R_M = 0,94 \frac{l}{r S_T} (mkT)^{1/2}, \text{ Па}\cdot\text{с}. \tag{11}$$

Из равенства сопротивлений, полученных по формулам (9) и (11), следует, что минимальная длина течи, при которой не учитывается падение давления, приблизительно равна радиусу круглой течи, т. е.  $l_{\min} \approx r$ .

**В диффузионном режиме течения газов** для определения сопротивления течи воспользуемся уравнением Фика [10], являющимся механическим аналогом напряженности электрического поля. Тогда число молекул, проходящих через единичную площадь в единицу

времени под действием перепада плотности газа, можно представить как  $N = -Ddn/dx$  [11], где  $D$  — коэффициент самодиффузии в однородной среде или коэффициент взаимной диффузии при наличии бинарной смеси газов;  $dn/dx$  — изменение плотности газа за единицу длины. При конечной длине течи  $l$  число молекул  $N = -D\Delta n/l$ , где  $\Delta n$  — перепад молекулярной плотности газа на течи.

С учетом этого выражения постоянная времени в уравнении (8) приобретает вид

$$\tau_i = \frac{1}{D} \frac{V_0 l}{S_T},$$

а сопротивление при диффузионном течении

$$R_D = \frac{kT}{D} \frac{l}{S_T}. \quad (12)$$

Из анализа формулы (12) следует, что сопротивление течи  $R_D$  прямо пропорционально вероятной энергии молекул  $kT$ , длине течи  $l$  и обратно пропорционально коэффициенту диффузии  $D$  и площади поперечного сечения течи  $S_T$ .

Граничные условия применения формул (9) и (12) позволяют определить минимальную длину течи, до которой не учитывается падение давления. Из равенства этих уравнений получим

$$l_{\min} = \frac{D}{v}. \quad (13)$$

Согласно газокINETической теории [12], скорость распространения волны сжатия  $v = (kT/m)^{1/2}$ , а коэффициент диффузии  $D = \lambda v_{н.д}/3$ . Здесь  $\lambda$  — длина свободного пробега молекулы,  $v_{н.д}$  — средняя скорость молекулы при диффузионном течении и нормальных условиях,

$$v_{н.д} = \left( \frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2},$$

где  $m$  — масса молекулы. При подстановке этих выражений в формулу (13) имеем  $l_{\min} = 0,53\lambda$ , т. е. минимальная длина течи, эквивалентная толщине тонкой стенки, при которой не учитывается падение давления, составляет примерно половину длины свободного пробега молекулы.

**В вязкостном режиме течения газов** при числе Кнудсена  $Kn < 0,01$  расчет сопротивления истечению осуществляется преобразованием формулы объемного расхода, выраженной в макроскопических величинах [13]:

$$Q = \frac{\pi r^4}{8\eta l} (p_1 - p_2). \quad (14)$$

Здесь  $\eta$  — коэффициент вязкости газа, определяемый по формуле Чепмена–Энскога [14]

$$\eta = \frac{5m}{16\sigma^2} \left( \frac{R_T T}{\pi} \right)^{1/2} = 0,18 \frac{1}{\sigma^2} (mkT)^{1/2},$$

где  $\sigma$  — газокINETический диаметр молекулы;  $R_T$  — газовая постоянная.

Подставив коэффициент вязкости  $\eta$  в формулу расхода (14) и преобразовав ее в молекулярный расход, получим

$$Q_B = 0,007 \frac{S_T^2}{l} \sigma^2 \left( \frac{kT}{m} \right)^{1/2} (n_1^2 - n_2^2), \text{ с}^{-1},$$

или

$$Q_B = 0,007 \frac{S_T^2}{l} (mkT)^{-1/2} \sigma^2 (n_1 + n_2) (p_1 - p_2).$$

Тогда выражение для определения сопротивления в вязкостном режиме приобретает вид

$$R_B = 141,76 \frac{l}{S_T^2} \frac{1}{\sigma^2} (mkT)^{1/2} \frac{1}{n_1 + n_2}, \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

**В молекулярно-вязкостном режиме течения газов** сопротивление их истечению при  $0,01 < Kn < 1$  рассчитывается по обобщенному уравнению Кнудсена в упрощенной форме [15]:

$$Q_{M-B} = Q_M + Q_B.$$

Формула для определения сопротивления в молекулярно-вязкостном режиме будет иметь вид

$$R_{M-B} = 133,25 \frac{l}{S_T} \frac{(mkT)^{1/2}}{0,94\sigma^2 (n_1 + n_2) + 141,76r}.$$

Выражения, полученные для вычисления сопротивлений истечения через круглые течи при различных режимах, могут быть использованы для определения сопротивления истечению через дефекты типа пор [16]. Истечение через дефекты типа трещин, согласно этому источнику, аналогично истечению через щелевую течь. Расчеты сопротивлений в этом случае подобны приведенному выше.

Формулы для расчета сопротивлений круглых и щелевых течей при испытании избыточным давлением и вакуумом приведены в табл. 2.

Таблица 2

Формулы для расчета сопротивлений течей

Режим течения	Испытания			
	избыточным давлением		вакуумом	
	Течи			
	круглые	щелевые	круглые	щелевые
Молекулярный	$0,94 \frac{l}{rS_r} (m_r kT)^{1/2}$	$0,94 \frac{(a+b)l}{(ab)^2} (mkT)^{1/2}$	$0,94 \frac{l}{rS_r} (m_b kT)^{1/2}$	$0,94 \frac{(a+b)l}{(ab)^2} (m_b kT)^{1/2}$
Молекулярно-вязкостный	$133,25 \frac{l}{S_r} \frac{(mkT)^{1/2}}{0,94\sigma^2(n_1+n_2)+141,76r}$	$3,99 \frac{(a+b)l}{(ab)^2} \frac{(mkT)^{1/2}}{0,94(a+b)b\sigma^2(n_1+n_2)+4,24a}$	$133,25 \frac{l}{S_r} \frac{(m_b kT)^{1/2}}{0,94\sigma^2 n_a S_r + 141,76r}$	$3,99 \frac{(a+b)l}{(ab)^2} \frac{(m_b kT)^{1/2}}{0,94(a+b)b\sigma^2 n_a + 4,24a}$
Вязкостный	$141,76 \frac{l}{S_r^2} \frac{(mkT)^{1/2}}{\sigma^2(n_1+n_2)}$	$4,24 \frac{l}{ab^3} \frac{(mkT)^{1/2}}{\sigma^2(n_1+n_2)}$	$144,76 \frac{l}{S_r^2} \frac{(m_b kT)^{1/2}}{\sigma^2 n_a}$	$4,24 \frac{l}{ab^3} \frac{(m_b kT)^{1/2}}{\sigma^2 n_a}$

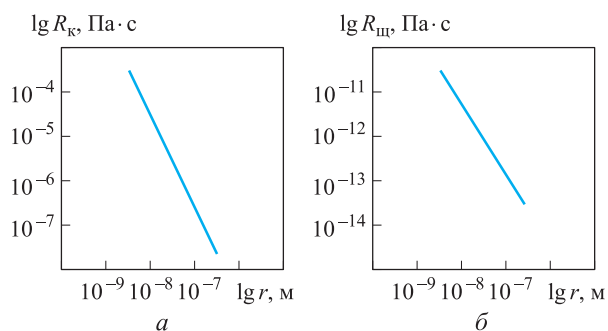
Примечание.  $m_b = 4,81 \cdot 10^{-26}$  кг — молекулярная масса воздуха;  $T_n = 273$  К;  $\sigma_b = 3,7 \cdot 10^{-10}$  м — газокинетический диаметр молекулы воздуха;  $a$  и  $b$  — ширина и высота щелевого дефекта (щели), м;  $n_a$  — молекулярная плотность при атмосферном давлении,  $m^{-3}$ .

Таблица 3

Формулы для расчета постоянной времени  $\tau_i$

Режим течения	Течи			
	круглые	щелевые		
	Способ контроля			
	камерный	бескамерный	камерный	бескамерный
Молекулярный	$0,94 \frac{l}{rS_r} (mkT)^{1/2} \xi_v n_i$	$0,94 \frac{l}{rS_r} (mkT)^{1/2} \left( \xi_v n_i + \frac{V}{kT} \right)$	$0,94 \frac{(a+b)l}{(ab)^2} (mkT)^{1/2} \xi_v n_i$	$0,94 \frac{(a+b)l}{(ab)^2} (mkT)^{1/2} \left( \xi_v n_i + \frac{V}{kT} \right)$
Молекулярно-вязкостный	$\frac{133,25 \frac{l}{S_r} (mkT)^{1/2}}{0,94\sigma^2(n_1+n_2)+141,76r}$	$\frac{l}{S_r} \frac{(mkT)^{1/2}}{0,94\sigma^2(n_1+n_2)+141,76r} \left( \xi_v n_i + \frac{V}{kT} \right)$	$3,99 \frac{(a+b)l}{(ab)^2} (mkT)^{1/2} \frac{1}{k_1} \xi_v n_i$	$3,99 \frac{(a+b)l}{(ab)^2} (mkT)^{1/2} \frac{1}{k_1} \left( \xi_v n_i + \frac{V}{kT} \right)$
Вязкостный	$141,76 \frac{l}{S_r^2} \frac{(mkT)^{1/2} \xi_v n_i}{\sigma^2(n_1+n_2)}$	$141,76 \frac{l}{S_r^2} \frac{(mkT)^{1/2}}{\sigma^2(n_1+n_2)} \left( \xi_v n_i + \frac{V}{kT} \right)$	$4,24 \frac{l(mkT)^{1/2}}{(ab)^3} \frac{\xi_v n_i}{\sigma^2(n_1+n_2)}$	$4,24 \frac{l}{(ab)^3} \frac{(mkT)^{1/2}}{\sigma^2(n_1+n_2)} \left( \xi_v n_i + \frac{V}{kT} \right)$

Примечание.  $n_i$  — молекулярная плотность газа по длине течи;  $k_1$  — постоянный коэффициент.



Характеристики течения газа через круглую (а) и щелевую (б) течи:

$$a — \lg R_k = f(\lg r); \quad б — \lg R_{щ} = f(\lg b)$$

Для оперативного определения зависимости сопротивления круглой течи  $R_k$  от радиуса  $r$  дефекта и сопротивления щелевой течи  $R_{щ}$  от высоты  $b$  щели построены графики (см. рисунок).

Формулы для расчета постоянной времени  $\tau_i$  при бескамерном и камерном способах контроля приведены в табл. 3, из которой следует, что динамические характеристики процессов в значительной степени зависят от объемного коэффициента  $\xi_V$ .

## Выводы

1. Проведен анализ работы проточных элементов при контроле герметичности, состоящих из дросселей и камер постоянного и переменного объемов.
2. Определены статические и динамические характеристики процессов истечения газов при различных режимах.

## Литература

- [1] Донской А.С. *Основы пневмоавтоматики*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 486 с.
- [2] Рындин В.В., Рындина Д.В. *Механика жидкости и газа*. Павлодар, Изд-во Павлодарского государственного университета, 2003. 580 с.
- [3] Андреева Л.Е. *Упругие элементы приборов*. Москва, Машгиз, 1962. 456 с.
- [4] 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.
- [5] Фудим Е.В. *Пневматическая вычислительная техника*. Москва, Наука, 1973. 528 с.
- [6] Макаров В.А., Тютяев Р.Е., Асадова Ю.С. Определение параметров течения газов в дефектах изделий методом электрогидравлической аналогии. *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. Сб. тр. IV Междунар. науч. конф.*, Москва, 24–25 ноября 2015 г., ИМАШ РАН МИРЭА, Москва, Спектр, 2015, с. 151–155.
- [7] Макаров В.А., Тютяев Р.Е., Асадова Ю.С. Анализ нестационарных процессов истечения газов через дефекты изделий. *Вектор науки и техники: социально-экономические и гуманитарные исследования современности. Сб. тр. IX Всерос. науч.-практ. конф.*, Ростов-на-Дону, ООО «Приоритет», 2015, с. 73–88.
- [8] Ключев В.В., ред. *Неразрушающий контроль. Справочник*. Т. 2, кн. 1. Москва, Машиностроение, 2003. 687 с.
- [9] Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. *Физика твердого тела для инженеров*. Москва, Техносфера, 2013. 587 с.
- [10] Макин Р.С. *Математические задачи нелинейной теории переноса. Газокинетическая теория*. Ульяновск–Дмитровград, Изд-во УлГТУ, 2006. 256 с.
- [11] Савельев И.В. *Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика. Т. 1*. Москва, Машиностроение, 1998. 320 с.
- [12] Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. *Механика и молекулярная физика*. Москва, ИД Интеллект, 2014. 400 с.
- [13] Арзуманов Ю.А., Ханатов Е.М., Чекмарев В.И., Чуканов К.П. *Математические модели систем пневмоавтоматики*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 296 с.
- [14] Кац М. *Несколько вероятностных задач физики и математики*. Москва, Наука, 1967. 176 с.
- [15] Попов Е.Д., Евлампиев А.И., Сажин С.Г., Сумкин П.С. *Течеискание*. Москва, Спектр, 2011. 208 с.

- [16] Левина Л.Е. Обобщенное эмпирическое уравнение для описания перетекания газов по малым каналам. *Дефектоскопия*, 1979, № 6, с. 94–98.

## References

- [1] Donskoi A.S. *Osnovy pnevmoavtomatiki* [Fundamentals of pneumatic]. Sankt-Petersburg, Politekhn. un-t publ., 2016. 486 p.
- [2] Ryndin V.V., Ryndina D.V. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid mechanics]. Pavlodar, Pavlodarskii gosudarstvennyi universitet publ., 2003. 580 p.
- [3] Andreeva L.E. *Uprugie elementy priborov* [Elastic elements of the devices]. Moscow, Mashgiz publ., 1962. 456 p.
- [4] Makarov V.A., Panov A.A. Germetologicheskii sintez uplotnitel'nykh system [Hematological synthesis of o-systems]. *Fundamental'nye issledovaniia i innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii. Sb. tr. 2 Mezhdunar. nauch. konf.* [Fundamental research and innovative engineering technologies. Proceedings of the 2 International scientific conference]. Moscow, 14–15 October 2012, IMASH RAN, Moscow, Spektr publ., 2012, pp. 107–115.
- [5] Fudim E.V. *Pnevmaticheskaiia vychislitel'naia tekhnika* [Pneumatic computing]. Moscow, Nauka publ., 1973. 528 p.
- [6] Makarov V.A., Tiutiaev R.E., Asadova Iu.S. Opredelenie parametrov techeniia gazov v defektakh izdelii metodom elektrogidravlicheskoii analoigii [Determination of the parameters of the flow of gases in defects products using electro-hydraulic analogy]. *Fundamental'nye issledovaniia i innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii. Sb. tr. 4 Mezhdunar. nauch. konf.* [Fundamental research and innovative engineering technologies. Proceedings of the 4 International scientific conference]. Moscow, 24–25 November 2015, IMASH RAN MIREA, Moscow, Spektr publ., 2015, pp. 151–155.
- [7] Makarov V.A., Tiutiaev R.E., Asadova Iu.S. Analiz nestatsionarnykh protsessov istecheniia gazov cherez defekty izdelii [Analysis of unsteady processes of flow of gases through the defects of the products]. *Vektor nauki i tekhniki: sotsial'no-ekonomicheskie i gumanitarnye issledovaniia sovremennosti. Sb. tr. 9 Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Vector science and technology: socio-economic and humanities research of our time. Proceedings of the 9 All-Russian scientific-practical conference]. Rostov-on-Don, Prioritet publ., 2015, pp. 73–88.
- [8] *Nerazrushaiushchii kontrol'. Spravochnik* [Non-destructive testing. Reference]. Ed. Kliuev V.V. Vol. 2. B. 1. Moscow, Mashinostroenie publ., 2003. 687 p.
- [9] Gurtov V.A., Osaulenko R.N. *Fizika tverdogo tela dlia inzhenerov* [Solid state physics for engineers]. Moscow, Tekhnosfera publ., 2013. 587 p.
- [10] Makin R.S. *Matematicheskie zadachi nelineinoi teorii perenosa. Gazokineticheskaiia teoriia* [Mathematical problems in nonlinear transport theory. Gas-kinetic theory]. Ul'ianovsk-Dimitrovgrad, UIGTU publ., 2006. 256 p.
- [11] Savel'ev I.V. *Kurs obshchei fiziki. Mekhanika. Molekuliarnaia fizika* [Course of General physics. Mechanics. Molecular physics]. Vol. 1, Moscow, Mashinostroenie publ., 1998. 320 p.
- [12] Landau L.D., Akhiezer A.I., Lifshits E.M. *Mekhanika i molekuliarnaia fizika* [Mechanics and molecular physics]. Moscow, ID Intellect publ., 2014. 400 p.
- [13] Arzumanov Iu.A., Khanatov E.M., Chekmarev V.I., Chukanov K.P. *Matematicheskie modeli sistem pnevmoavtomatiki* [Mathematical model of pneumatic systems]. Moscow, Bauman Press, 2009. 296 p.
- [14] Kats M. *Neskol'ko veroiatnostnykh zadach fiziki i matematiki* [Several probability problems of physics and mathematics]. Moscow, Nauka publ., 1967. 176 p.
- [15] Popov E.D., Evlampiev A.I., Sazhin S.G., Sumkin P.S. *Techeiskanie* [Leak testing]. Moscow, Spektr publ., 2011. 208 p.
- [16] Levina L.E. Obobshchennoe empiricheskoe uravnenie dlia opisaniia peretekaniia gazov po malym kanalams [A generalized empirical equation to describe the gas flow in small channels]. *Defektoskopiia* [Russian Journal of Nondestructive Testing]. 1979, no. 6, pp. 94–98.

## 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, ш. 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, 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).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет 2-е издание монографии  
**Л.И. Пономарева, В.А. Вечтомова,  
А.С. Милосердова**

### «Бортовые цифровые многолучевые антенные решетки для систем спутниковой связи»

Рассмотрены возможности спутниковых многолучевых зеркальных и линзовых антенн, а также особенности построения бортовых цифровых многолучевых антенных решеток на основе крупноапертурных зеркальных и линзовых излучателей. Приводятся результаты оптимизации структуры и характеристик крупноапертурных излучателей, а также антенных решеток из них. Показаны преимущества многолучевых крупноапертурных излучателей при построении антенных решеток для глобальных систем спутниковой связи и возможные схемотехнические и конструктивные решения по построению цифровых антенных решеток.

Для специалистов в области разработки систем спутниковой связи, а также аспирантов и студентов, обучающихся по специальностям «Радиоэлектронные системы и комплексы» и «Радиотехника».

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru