

УДК 621.5-52:62-543.2

doi: 10.18698/0536-1044-2022-3-103-112

Разработка методики наполнения полостей устройств пневмоавтоматики газом при пневмовакuumных испытаниях

А.Р. Алиев

Конструкторское бюро «Арматура» — филиал АО «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева»

Development of a Technique for Filling Pneumatic Automation Device Chambers During Pneumatic Vacuum Tests

A.R. Aliev

Design Bureau «Armatura», branch of JSC «Khrunichev State research and Production Space Center»

Рассмотрена автоматизированная система наполнения рабочей полости образцов пневмоавтоматики контрольным газом при испытаниях на герметичность. Предложена новая методика наполнения рабочей полости контрольным газом, позволяющая существенно сократить продолжительность испытаний повышением интенсивности теплообмена. Проведено сравнение процессов наполнения рабочей полости изделия газом по типовой и разработанной методикам. Установлено, что предложенная методика при проверке герметичности изделия обеспечивает существенное сокращение времени наполнения рабочей полости газом, исключая значительные колебания его температуры и напряжений внутри материала изделия.

Ключевые слова: методика наполнения газом, пневмовакuumные испытания, испытания на герметичность, наполнение полости газом

The article considers an automated system for filling the pneumatic automatic device working chambers with gas during leak tests. A new algorithm for the filling process is proposed allowing significant reduction of the duration of tests by increasing the intensity of heat exchange. The processes of filling the working chamber with gas according to the standard and developed algorithms are compared. It has been found that the proposed algorithm, when checking the tightness of the product, provides a significant reduction in the time of filling the chamber with gas, excluding significant fluctuations in the gas temperature and stresses inside the product material.

Keywords: gas filling technique, pneumatic vacuum tests, leak tests, filling the chamber with gas, automation of the process

Создание устройств, агрегатов и систем пневмоавтоматики любого назначения включает в себя различные виды испытаний, подтверждающие те или иные характеристики изделия. В авиационной, ракетно-космической и судостроительной промышленности особое внимание уделяется высокой степени герметичности

изделий. При этом требования по их герметичности рассматриваются наравне с основными требованиями назначения изделий [1–7], а контроль их герметичности относится к самым ответственным этапам испытаний [7–13].

Наиболее распространенной технологией контроля герметичности изделия является тех-

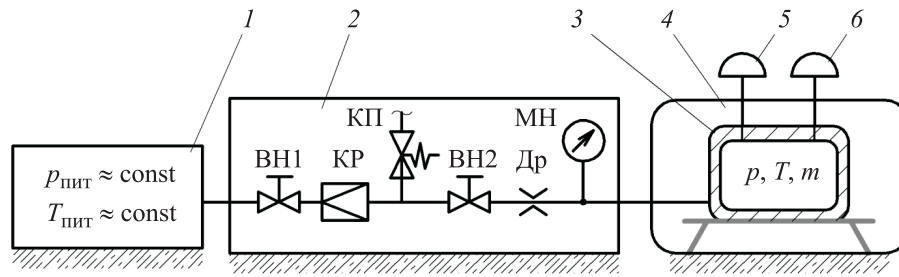


Рис. 1. Принципиальная схема установки для испытания изделия на герметичность:
 1 — источник питания; 2 — система регулирования процесса наполнения; 3 — испытуемое изделие;
 4 — вакуумная камера; 5 — датчик давления; 6 — датчик температуры;
 ВН1, ВН2 — вентили; КП — клапан предохранительный; КР — регулятор давления газа;
 МН — манометр; Др — дроссель

нология с использованием методики пневмовакуумных испытаний [3–6, 14–25]. Исследуемое изделие помещают в вакуумную камеру и наполняют испытуемую рабочую полость (далее РП) контрольным газом (далее газ) или смесью газов. По значению утечки газа из РП в объем вакуумной камеры определяют степень герметичности изделия. Принципиальная схема установки для испытания изделия на герметичность приведена на рис. 1.

Испытания изделия на герметичность проводят следующим образом. Контрольный газ из источника питания (чаще всего из секции баллонов) поступает в систему регулирования процесса наполнения 2. В ее состав входят регулирующая, предохранительная, запорно-распределительная и фильтрующая пневмоарматура, а также средства измерения давления и температуры.

Из системы регулирования газ с определенными параметрами (давлением, температурой, расходом) поступает в РП испытуемого изделия 3. При достижении в РП требуемых значений параметров газа (давления, температуры) определяют значение его утечки, и, как следствие, степень герметичности изделия [3–6, 8, 9, 14–26].

Наполнение РП изделия газом — трудоемкий и длительный процесс. Важной особенностью этого процесса является постоянный контроль параметров газа в РП [22, 27], так как при дросселировании газа возможно существенное изменение его температуры и необратимые температурные деформации изделия [28–30].

Цель статьи — разработать методику наполнения РП изделий газом при их испытании на герметичность, позволяющую исключить указанные недостатки и сократить время и трудоемкость пневмовакуумных испытаний.

Рассмотрим процесс наполнения РП изделия газом вручную и примем его за типовой, как получивший наибольшее распространение. В ручном режиме этот процесс носит многоступенчатый характер [14–17, 20, 23, 25, 31, 32]. Каждая последующая ступень состоит из двух периодов — наполнения и выдержки.

Период наполнения начинается с подачи газа в РП от источника питания с давлением $p_{\text{пит}}$. При достижении температурой газа допустимого значения $T_{\text{доп}}$ его подача прекращается, и начинается период выдержки, на протяжении которого температура газа вследствие теплообмена со стенками РП уменьшается.

При достижении заданной разницы между температурами начала и окончания периода выдержки подача газа в РП возобновляется, и начинается следующая ступень. Процесс заканчивается, когда давление становится равным допустимому значению $p_{\text{доп}}$. Время наполнения РП в целом равно сумме времени каждой ступени.

Используя основные положения термодинамики тела переменной массы, получим совокупность зависимостей, отражающих типовую методику наполнения РП изделия газом. Примем, что параметры газа в источнике питания (давление $p_{\text{пит}}$ и температура $T_{\text{пит}}$) и объем РП изделия W являются постоянными величинами. В качестве параметров газа в РП выберем давление p , температуру T и массу m .

В равновесном состоянии параметры газа в РП связаны термическим уравнением состояния

$$pW = mRT, \quad (1)$$

где R — газовая постоянная.

Уравнение баланса энергий для процесса наполнения имеет вид [33]

$$\frac{dU}{dT} = \Pi_{\text{пит}} G = \frac{dQ}{dt}, \quad (2)$$

где U — внутренняя энергия газа в РП; $\Pi_{\text{пит}}$ — удельный приход энергии в РП; G — массовый расход газа; dQ/dt — интенсивность отвода теплоты от газа.

Так как параметры газа в источнике питания постоянны, удельный приход энергии в РП остается неизменным. Из анализа выражения (2) следует, что без применения устройств дополнительного отвода теплоты от газа регулировать параметры газа в РП можно только путем изменения его расхода G .

Калорическое уравнение состояния газа в РП, отражающее связь внутренней энергии с параметрами газа, имеет вид

$$U = U(T, m). \quad (3)$$

Тогда с учетом выражения изменения количества вещества

$$dm/dt = G, \quad (4)$$

проинтегрировав обе части уравнения (2) по времени от начала процесса наполнения t_0 до его окончания t_k , получим выражение

$$U_k - U_0 = \Pi_{\text{пит}} (m_k - m_0) - Q_{\Sigma}, \quad (5)$$

где U_k и U_0 — внутренняя энергия газа в конце и начале процесса наполнения соответственно; m_k и m_0 — масса газа в РП в конце и начале процесса наполнения соответственно; Q_{Σ} — суммарное количество теплоты, отведенное от газа при наполнении РП.

Из анализа выражения (5) следует, что этап наполнения состоит из двух процессов, влияющих друг на друга. Первый процесс — наполнение полости газом общей массой m_k ко времени t_k , второй — отвод теплоты от газа в количестве Q_{Σ} ко времени t_k . При этом отведенного до этого количества теплоты должно быть достаточно в каждый момент времени, чтобы температура и давление газа не превышали максимальные допустимые значения T_{max} и p_{max} .

Исследуем период наполнения для одной из ступеней. Скоротечность процесса наполнения допускает его рассмотрение без учета влияния теплообмена. Расход газа в РП зависит от давления на входе вентиля ВН2 и площади дросселя Др (см. рис. 1).

Давление газа на входе дросселя Др (давление настройки регулятора) $p_{\text{др}}$ целесообразно

назначить из условия, что на всех ступенях процесс наполнения РП протекает при критическом режиме течения газа через дроссель Др. Обеспечить это условие можно при соблюдении соотношения

$$p_3/p_2 \leq \delta_{\text{кр}},$$

где $\delta_{\text{кр}} = (2/k+1)^{k/(k-1)}$, k — показатель адиабаты для газа.

В этом случае скорость нарастания давления газа при наполнении РП на всех ступенях будет одинаковой, а для случая идеального газа постоянной. Скорость нарастания давления газа определяется выражением

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\mu_{\text{др}} f_{\text{др}} k k_0 p_{\text{др}} \sqrt{RT_{\text{др}}}}{W}, \quad (6)$$

где $\mu_{\text{др}}$ и $f_{\text{др}}$ — коэффициент расхода газа и площадь проходного сечения дросселя Др соответственно; k_0 — постоянный параметр,

$$k_0 = \sqrt{k(2/k+1)^{(k+1)/(k-1)}};$$

$T_{\text{др}}$ — температура газа на входе в РП (после дросселя Др).

При заданных значениях скорости нарастания давления газа dp/dt и давления настройки регулятора $p_{\text{др}}$ по выражению (6) находим эффективную площадь дросселя $f_{\text{др}}$, а при известном коэффициенте расхода $\mu_{\text{др}}$ — требуемый диаметр дросселя Др.

Рассмотрим период выдержки, когда имеет место только процесс теплообмена газа со стенками РП изделия, т. е. тепловой процесс после закрытия запорно-распределительной пневмоарматуры — вентиля ВН2 (см. рис. 1).

Объектом испытания зачастую выступает герметичная тонкостенная оболочка, изготовленная из материала, имеющего высокую теплопроводность [19, 24, 25]. В этом случае допустимо усреднить температуру стенки РП $T_{\text{ст}}$ по всему объему материала конструкции.

Считаем, что во всем объеме РП температура газа T одинаковая. Также принимаем одинаковыми условия взаимодействия газа и стенок конструкции. С учетом этих допущений математическая модель теплового процесса в РП при постоянной массе газа имеет следующий вид [33]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c_w m} \frac{dQ}{dt}; \quad (7)$$

$$\frac{dT_{\text{ст}}}{dt} = \frac{1}{c_{\text{ст}} m_{\text{ст}}} \frac{dQ_{\text{ст}}}{dt}; \quad (8)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha_{\tau} F_{\text{ст}} (T_{\text{ст}} - T); \quad (9)$$

$$\frac{dQ_{\text{ст}}}{dt} = -\frac{dQ}{dt}, \quad (10)$$

где c_W — удельная изохорная теплоемкость газа; $c_{\text{ст}}$ — удельная теплоемкость материала стенки РП; $m_{\text{ст}}$ — масса стенки РП; $Q_{\text{ст}}$ — количество теплоты, отдаваемое газом стенке РП; α_{τ} — коэффициент теплоотдачи от газа к стенке РП; $F_{\text{ст}}$ — площадь поверхности теплоотдачи.

Характер теплообмена — свободная конвекция. Для расчета коэффициента α_{τ} используем критериальную зависимость

$$\text{Nu} = 0,63(\text{Gr Pr})^{0,25},$$

где Nu , Gr и Pr — число Нуссельта, Грасгофа и Прандтля соответственно.

Коэффициент теплоотдачи от газа к стенке РП, принятый одинаковым в процессе наполнения на всех ступенях, определяется выражением [34]

$$\alpha_{\tau} = \frac{\text{Nu} \lambda}{\chi},$$

где λ — коэффициент теплопроводности газа; χ — характерный размер.

Рассмотрим математическую модель процесса наполнения РП изделия газом в целом. Считаем, что свойства контрольного и идеального газов близки. Тогда уравнение (1) принимает вид

$$pW = \frac{m}{\mu} R_0 T, \quad (11)$$

где μ — молярная масса газа; R_0 — универсальная газовая постоянная.

Уравнение (3) с учетом выражения (11) можно записать в виде

$$U = \frac{m R_0 T}{\mu(k-1)} = \frac{pW}{k-1}. \quad (12)$$

Продифференцировав уравнение (12) с учетом выражения (4) при постоянном объеме РП изделия ($W = \text{const}$) имеем

$$\frac{dU}{dt} = \frac{R_0}{\mu(k-1)} \left(m \frac{dT}{dt} + TG \right).$$

Подставив эту формулу в уравнение (2), получим выражение

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\mu(k-1)}{R_0 m} \left[\Pi_{\text{пит}} - T \frac{R_0}{\mu(k-1)} G - \frac{dQ}{dt} \right]. \quad (13)$$

Анализ выражения (13) позволяет сделать вывод, что с увеличением температуры и массы газа при постоянном расходе G скорость повышения его температуры в РП изделия уменьшается.

Решение системы уравнений (4), (7)–(13) позволяет провести моделирование процесса наполнения РП газом. Расчет этого процесса по типовой методике проведен с помощью отечественной системы модельно-ориентированного проектирования SimInTech. Полученные временные зависимости температуры стенки РП изделия $T_{\text{ст}}$, давления p , температуры T , расхода G и массы газа m при наполнении им РП объемом $0,524 \text{ м}^3$ приведены на рис. 2.

Типовая методика наполнения РП изделия газом включает в себя следующие операции:

- подачу газа в РП с заданным расходом (обеспечиваемую системой регулирования процесса наполнения);

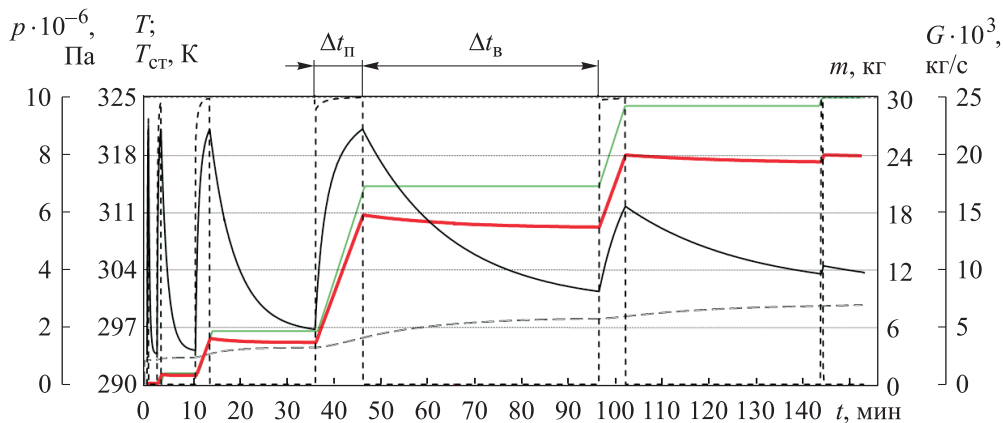


Рис. 2. Зависимости температуры стенки РП $T_{\text{ст}}$ (---), давления p (—), температуры T (—), расхода G (----) и массы газа m (—) от времени t , полученные по типовой методике наполнения РП изделия газом

- прекращение подачи газа при достижении максимального допустимого значения температуры или давления газа в РП (в рассматриваемом случае $T_{\max} = 323,15 \text{ К}$, $p_{\max} = 8 \cdot 10^6 \text{ МПа}$);

- выдержку газа в РП после прекращения его подачи до момента, когда скорость снижения его температуры не станет меньше заданного значения;

- возобновление подачи газа, если давление в РП на момент окончания выдержки меньше значения, определяемого выражением

$$[p] = (p_{\max} - \Delta p_{\text{доп}}),$$

где $\Delta p_{\text{доп}} = 0,05 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $[p] = 7,95 \cdot 10^6 \text{ Па}$; иначе наполнение считается законченным.

На рис. 2 отчетливо видны моменты начала и окончания подачи газа в РП изделия. Общее время ее наполнения составило 153 мин, максимальный массовый расход газа — 0,025 кг/с.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что при типовой методике наполнения РП изделия газом наибольшую часть времени составляют периоды выдержки. Это связано с недостаточно интенсивным отводом тепла от газа. Например, на одной из ступеней процесса (см. рис. 2) продолжительность подачи газа $\Delta t_{\text{п}}$ составила 10 мин, а время последующей выдержки $\Delta t_{\text{в}}$ — 50 мин.

Это объясняется тем, что согласно системе уравнений (7)–(10) интенсивность отвода теплоты от газа пропорциональна разности температур газа T и материала стенки $T_{\text{ст}}$. Так как при выдержке температура газа уменьшается, а

температура стенки повышается, интенсивность отвода теплоты от газа снижается.

Для сокращения времени наполнения РП изделия газом разработана более эффективная методика, заключающаяся в следующем. После первой подачи газа в РП (при достижении максимального допустимого значения его температуры) поддерживается температура газа с расходом $G_{\text{т}}$. В этом случае интенсивность отвода теплоты от газа будет максимальной вследствие достижения наибольшей разницы между температурами газа и стенки РП изделия.

Из выражения (13) следует

$$G_{\text{т}} = \frac{1}{\Pi_{\text{пит}} - R_0 T_{\max} / [\mu(k-1)]} \frac{dQ}{dt}. \quad (14)$$

Предложенную методику наполнения можно реализовать в автоматизированной системе управления наполнением РП изделия газом при пневмовакуумных испытаниях с применением обратной связи по его температуре. Применение обратной связи позволяет автоматически поддерживать расход газа на уровне $G_{\text{т}}$ согласно выражению (14).

Разработанная методика наполнения РП изделия газом включает в себя следующие операции:

- подачу газа с регулированием его расхода в зависимости от рассогласования между максимальным допустимым и текущим значениями температуры газа в РП;
- прекращение подачи газа при достижении максимального допустимого значения его температуры или давления в РП;

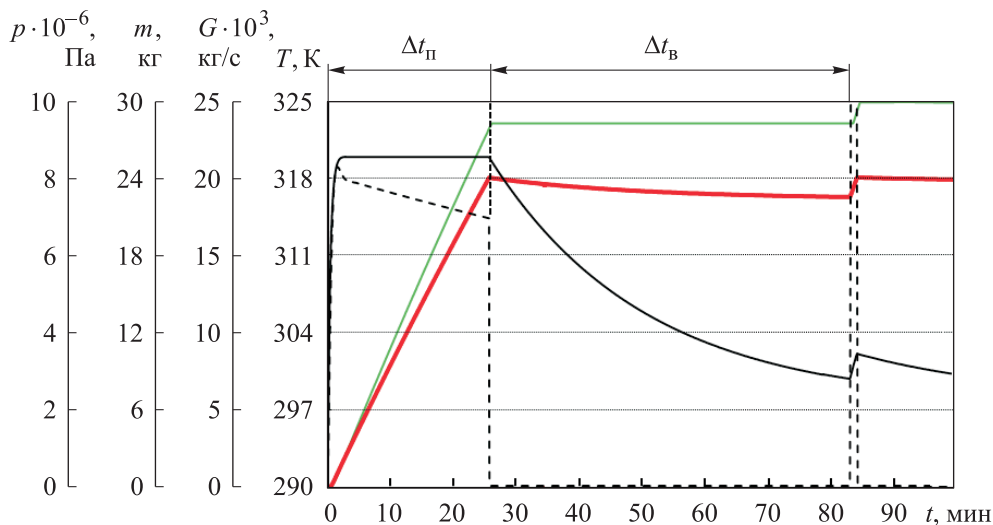


Рис. 3. Зависимости давления p (—), массы m (—), расхода G (---) и температуры газа (—) T от времени t , полученные по предложенной методике наполнения РП изделия газом

- выдержку, продолжающуюся до тех пор, пока скорость снижения температуры газа не станет меньше заданного значения;

- возобновление подачи газа, если его давление в РП на момент окончания выдержки меньше величины $[p]$, иначе процесс наполнения считается оконченным.

Графические зависимости давления p , массы m , расхода G и температуры газа T от времени t , полученные по предложенной методике наполнения РП изделия газом, приведены на рис. 3. Суммарное время наполнение РП составило 99 мин.

Вывод

Для проверки герметичности РП изделий предложена методика их наполнения газом, позволяющая существенно сократить продолжительность этого процесса, а также исключить значительные колебания температуры газа в РП и напряжений внутри материала устройства пневмоавтоматики, что способствует снижению трудоемкости и повышению качества пневмовакуумных испытаний современной техники.

Литература

- [1] Веселков В.В., Рыдловский В.П., Штайц В.В. Совершенствование технологии испытаний на герметичность защитных оболочек атомных судов новых проектов. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 2018, т. 10, № 2, с. 346–355, doi: <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2018-10-2-346-355>
- [2] Чубарь А.В., Пастушенко О.В., Колчанов И.П. Перспективы улучшения характеристик испытательного стенда для контроля герметичности систем космических аппаратов связи. Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 2014, № 7, с. 811–820.
- [3] Кишкин А.А., Колчанов И.П., Делков А.В. и др. К вопросу повышения чувствительности локальных методов контроля герметичности для изделий ракетно-космической техники. Вестник СибГАУ им. академика М.Ф. Решетнева, 2014, № 1, с. 127–133.
- [4] Беляков И.Т., Зернов И.А., ред. Технология сборки и испытаний космических аппаратов. Москва, Машиностроение, 1990. 352 с.
- [5] Холодков Н.В., ред. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов. Москва, изд-во МАИ, 1994. 412 с.
- [6] Гардымов Г.П., Парфенов Б.А., Пчелинцев А.В. Технология ракетостроения. Санкт-Петербург, Специальная литература, 1997. 320 с.
- [7] Макаров Ю.Н., Соколов Ю.А. Инновационная деятельность ракетно-космической отрасли в части решения технологических проблем обеспечения качества, надежности и безопасности перспективных изделий ракетно-космической техники. Москва, НИИ ЭНЦИТЕХ, 2015. 411 с.
- [8] Барышников В.И., Розанов Л.Н., Соколов А.Н. и др. Масс-спектрометрический контроль герметичности крупных объектов методом натекания пробного вещества. Вакуумная техника и технология, 2019, № 2, с. 47–51.
- [9] Розин А.Я. Сравнительный анализ технологических показателей методов контроля герметичности металлоконструкций. Технология машиностроения, 2019, № 8, с. 46–51.
- [10] Хамиц И.И., Филиппов И.М., Бурылов Л.С. и др. Трансформируемые крупногабаритные конструкции для перспективных пилотируемых комплексов. Космическая техника и технологии, 2016, № 2, с. 23–33.
- [11] Микрин Е.А. Перспективы развития отечественной пилотируемой космонавтики (к 110-летию со дня рождения С.П. Королева). Космическая техника и технология, 2017, № 1, с. 5–11.
- [12] Микрин Е.А. Научно-технические проблемы реализации проекта «Пилотируемые космические системы и комплексы». Космическая техника и технология, 2019, № 3, с. 5–19.
- [13] Хамиц И.И., Поздняков С.С., Филиппов И.М. и др. Испытания макета трансформируемого модуля космических и планетных станций. Космическая техника и технология, 2020, № 1, с. 60–70, doi: <https://doi.org/10.33950/spacetech-2308-7625-2020-1-60-70>

- [14] Горгидзе А.Д., Липняк Л.В., Ольшанский В.А. и др. Способ контроля герметичности изделий. Патент СССР1840701. Заявл. 28.12.1978, опубл. 10.12.2008.
- [15] Липняк Л.В., Панов Н.Г., Попов А.Д. Способ контроля герметичности изделий. Патент РФ 2016385. Заявл. 19.07.1991, опубл. 15.07.1994.
- [16] Зяблов В.А., Напитухин Л.Е., Щербаков Э.В. Способ испытаний изделий на герметичность. Патент РФ 2194260. Заявл. 17.01.2001, опубл. 10.12.2002.
- [17] Горгидзе А.Д., Липняк Л.В., Ольшанский В.А. и др. Способ контроля герметичности изделий, работающих под давлением. Патент СССР 1772639. Заявл. 30.06.1978, опубл. 30.10.1992.
- [18] Щербаков Э.В., Липняк Л.В. Способ контроля герметичности изделий. Патент СССР 1837173. Заявл. 19.05.1980, опубл. 30.08.1993.
- [19] Алиев А.Р. Анализ требований к материалам герметичных тонкостенных оболочек изделий ракетно-космической техники. Сб. ст. Всерос. науч.-тех. и науч.-метод. конф. с международным участием Гидропневмоавтоматика и гидропривод. Ковров, КГТА им. В.А. Дегтярева, 2020, с. 79–93.
- [20] Зяблов В.А., Оксов И.А., Тройников В.И. и др. Способ измерения степени суммарной герметичности многополостного изделия. Патент РФ 2712762. Заявл. 20.03.2019, опубл. 31.01.2020.
- [21] Тройников В.И., Щербаков Э.В. Способ определения негерметичности изделий, работающих под внешним и внутренним избыточным давлением. Патент РФ 2716474. Заявл. 25.05.2019, опубл. 11.03.2020.
- [22] Тройников В.И., Щербаков Э.В. Способ испытаний изделий на суммарную герметичность. Патент 2654340. Заявл. 28.11.2016, опубл. 17.05.2018.
- [23] Моисеев В.А., Тарасов В.А., Колмыков В.А. и др. Технология производства жидкостных ракетных двигателей. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 380 с.
- [24] Алиев А.Р. Анализ конструкций тонкостенных изделий ракетно-космической техники, подвергаемых пневмовакуумным испытаниям. Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Сб. мат. и док. XXIV Межд. науч.-тех. конф. студентов и аспирантов. Москва, Мир науки, 2020, с. 33–44.
- [25] Алиев А.Р., Тимофеев Ю.М., Халатов Е.М. Методика упрощенного расчета параметров процесса наполнения полостей изделий ракетно-космической техники при пневмовакуумных испытаниях. Контроль. Диагностика, 2018, № 6, с. 28–33, doi: <https://doi.org/10.14489/td.2018.06.pp.028-033>
- [26] Cohen J.P. Method and system for temperature-controlled gas dispensing. Patent US 20140311622. Appl. 04.22.2013, publ. 10.23.2014.
- [27] Hoath S.D. Methods and apparatus for leak testing. Patent JP 2008008910-A. Appl. 04.09.2007, publ. 17.01.2008.
- [28] Гуляев А.И. Способ наполнения сосуда сжатым газом. Патент СССР 744186. Заявл. 13.12.1977, опубл. 30.06.1980.
- [29] Алиев А.Р., Халатов Е.М. Повышение эффективности пневмоиспытаний изделий ракетно-космической техники посредством автоматизации приготовления контрольных смесей. Молодежный научно-технический вестник, 2015, № 9. URL: <http://ainsnt.ru/doc/801746.html>
- [30] Аникейчик Н.Д., Антропов О.А., Баранов Л.Т. и др. Теория и практика эксплуатации объектов космической инфраструктуры. Т. 1. Объекты космической инфраструктуры. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2006. 400 с.
- [31] Wu X., Liu J., Shao J., et al. Fast filling strategy of type III on-board hydrogen tank based on time-delayed method. Int. J. Hydrog. Energy, 2021, vol. 46, no. 57, pp. 29288–29296, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.094>
- [32] Dicken C.J.B., Merida W. Modeling the transient temperature distribution within a hydrogen cylinder during refueling. Numer. Heat Tr. A-Appl., 2007, vol. 53, no. 7, doi: <https://doi.org/10.1080/10407780701634383>
- [33] Арзуманов Ю.Л., Халатов Е.М., Чекмазов В.И. Основы проектирования систем пневмо- и гидроавтоматики. Москва, Спектр, 2017. 459 с.
- [34] Арзуманов Ю.Л., Халатов Е.М., Чекмазов В.И., Чуканов К.П. Основы построения математических моделей функционирования устройств пневмоавтоматики. Москва, Спектр, 2015. 130 с.

References

- [1] Veselkov V.V., Rydlovskiy V.P., Shtayts V.V. Advancement of leakages testing technology for testing reactor containments of new atomic vessels. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 346–355, doi: <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2018-10-2-346-355> (in Russ.).
- [2] Chubar' A.V., Pastushenko O.V., Kolchanov I.P. Prospects of improvement of descriptions of tent-bed test for control of impermeability of systems of space vehicles of connection. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii [Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies]*, 2014, no. 7, pp. 811–820. (In Russ.).
- [3] Kishkin A.A., Kolchanov I.P., Delkov A.V., et al. The problem of increasing the sensitivity of local control methods for tightness products of rocket and space technology. *Vestnik SibGAU im. akademika M.F. Reshetneva*, 2014, no. 1, pp. 127–133. (In Russ.).
- [4] Belyakov I.T., Zernov I.A., eds. *Tekhnologiya sborki i ispytaniy kosmicheskikh apparatov [Assembly and test technology of spacecraft]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 352 p. (In Russ.).
- [5] Kholodkov N.V., ed. *Eksperimental'naya otrabotka kosmicheskikh letatel'nykh apparatov [Experimental adjustment of spacecraft]*. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 1994. 412 p. (In Russ.).
- [6] Gardymov G.P., Parfenov B.A., Pchelintsev A.V. *Tekhnologiya raketostroeniya [Rocket-building technology]*. Sankt-Petersburg, Spetsial'naya literatura Publ., 1997. 320 p. (In Russ.).
- [7] Makarov Yu.N., Sokolov Yu.A. Innovatsionnaya deyatel'nost' raketno-kosmicheskoy otrasli v chasti resheniya tekhnologicheskikh problem obespecheniya kachestva, nadezhnosti i bezopasnosti perspektivnykh izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki [Innovative activity in rocket-space field in solving technological problems of quality, reliability and safety of advanced rocket-space technics]. Moscow, NII ENTsITEKh Publ., 2015. 411 p. (In Russ.).
- [8] Baryshnikov V.I., Rozanov L.N., Sokolov A.N., et al. Mass- spectrometric hermiticity control of large objects using method of test material leakage. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya*, 2019, no. 2, pp. 47–51. (In Russ.).
- [9] Rozinov A.Ya. Comparative analysis of the control methods technological indicators of the metalware tightness. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2019, no. 8, pp. 46–51. (In Russ.).
- [10] Khamits I.I., Filippov I.M., Burylov L.S., et al. Large transformable structures for advanced manned complexes. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii [Space Technique and Technologies]*, 2016, no. 2, pp. 23–33. (In Russ.).
- [11] Mikrin E.A. Outlook for our country's manned spaceflight development (to mark the 110th anniversary of S.P. Korolev). *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya [Space Technique and Technologies]*, 2017, no. 1, pp. 5–11. (In Russ.).
- [12] Mikrin E.A. Scientific and engineering problems involved in the implementation of the project "Manned space systems and complexes". *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya [Space Technique and Technologies]*, 2019, no. 3, pp. 5–19. (In Russ.).
- [13] Khamits I.I., Pozdnyakov S.S., Filippov I.M., et al. Tests of a mockup of a transformable module for space and planetary stations. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya [Space Technique and Technologies]*, 2020, no. 1, pp. 60–70, doi: <https://doi.org/10.33950/spacetech-2308-7625-2020-1-60-70> (in Russ.).
- [14] Gorgidze A.D., Lipnyak L.V., Ol'shanskiy V.A., et al. Sposob kontrolya germetichnosti izdeliy [Method of testing articles for tightness]. Patent SU 1840701. Appl. 28.12.1978, publ. 10.12.2008. (In Russ.).
- [15] Lipnyak L.V., Panov N.G., Popov A.D. Sposob kontrolya germetichnosti izdeliy [Method of testing articles for tightness]. Patent RU 2016385. Appl. 19.07.1991, publ. 15.07.1994. (In Russ.).
- [16] Zyablov V.A., Napitukhin L.E., Shcherbakov E.V. Sposob ispytaniy izdeliy na germetichnost' [Method of testing articles for tightness]. Patent RU 2194260. Appl. 17.01.2001, publ. 10.12.2002. (In Russ.).
- [17] Gorgidze A.D., Lipnyak L.V., Ol'shanskiy V.A., et al. Sposob kontrolya germetichnosti izdeliy, rabotayushchikh pod davleniem [Method for hermiticity control of parts working under pressure]. Patent SU 1772639. Appl. 30.06.1978, publ. 30.10.1992. (In Russ.).

- [18] Shcherbakov E.V., Lipnyak L.V. Sposob kontrolya germetichnosti izdeliy [Method of testing articles for tightness]. Patent SU 1837173. Appl. 19.05.1980, publ. 30.08.1993. (In Russ.).
- [19] Aliev A.R. [Analysis of requirements to vacuum-tight thin-walled shells of aircraft parts]. Sb. st. Vseros. nauch.-tekh. i nauch.-metod. konf. s mezhdunarodnym uchastiem Gidropnevmoavtomatika i gidroprivod [Proc. Russ. Sci.-tech. Sci.-Pract. Conf. with Int. Anticipation Hydraulic and Pneumatic Control Systems and Hydraulic Drive]. Kovrov, KGTA im. V.A. Degtyareva Publ., 2020, pp. 79–93. (In Russ.).
- [20] Zyablov V.A., Oksov I.A., Troynikov V.I., et al. Sposob izmereniya stepeni summarnoy germetichnosti mnogopolostnogo izdeliya [Measurement technique for grade of summarized tightness of multicavity items]. Patent RU 2712762. Appl. 20.03.2019, publ. 31.01.2020. (In Russ.).
- [21] Troynikov V.I., Shcherbakov E.V. Sposob opredeleniya negermetichnosti izdeliy, rabotayushchikh pod vneshnim i vnutrennim izbytochnym davleniem [Method of determining leakage of articles operating under external pressure and internal excess pressure]. Patent RU 2716474. Appl. 25.05.2019, publ. 11.03.2020. (In Russ.).
- [22] Troynikov V.I., Shcherbakov E.V. Sposob ispytaniy izdeliy na summarnuyu germetichnost' [Method of testing products on total leakage]. Patent 2654340. Appl. 28.11.2016, publ. 17.05.2018.
- [23] Moiseev V.A., Tarasov V.A., Kolmykov V.A., et al. Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley [Production technology for liquid rocket engines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 380 p. (In Russ.).
- [24] Aliev A.R. [Design analysis of thin-walled rocket-space technique parts under vacuum leak test]. Sb. mat. i dok. XXIV Mezhd. nauch.-tekh. konf. studentov i aspirantov Gidravlicheskie mashiny, gidroprivody i gidropnevmoavtomatika [Proc. XXIV Int. Sci.-Tech. Conf. Students and Postgraduates Hydraulic Machines, Drives and Hydraulic and Pneumatic Control Systems]. Moscow, Mir nauki Publ., 2020, pp. 33–44. (In Russ.).
- [25] Aliev A.R., Timofeev Yu.M., Khalatov E.M. Simplified analysis procedure of parameters for filling the chambers of rocket and space engineering products during pneumovacuum tests. Kontrol'. Diagnostika [Testing. Diagnostics], 2018, no. 6, pp. 28–33, doi: <https://doi.org/10.14489/td.2018.06.pp.028-033> (in Russ.).
- [26] Cohen J.P. Method and system for temperature-controlled gas dispensing. Patent US 20140311622. Appl. 04.22.2013, publ. 10.23.2014. (In Russ.).
- [27] Hoath S.D. Methods and apparatus for leak testing. Patent JP 2008008910-A. Appl. 04.09.2007, publ. 17.01.2008. (In Russ.).
- [28] Gulyaev A.I. Sposob napolneniya sosuda szhatym gazom [Method for filling a container with pressurized gas]. Patent SU 744186. Appl. 13.12.1977, publ. 30.06.1980. (In Russ.).
- [29] Aliev A.R., Khalatov E.M. Raising efficiency of air leak test for aircraft by automation of producing control mixes. Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik, 2015, no. 9. URL: <http://ainsnt.ru/doc/801746.html> (in Russ.).
- [30] Anikeychik N.D., Antropov O.A., Baranov L.T., et al. Teoriya i praktika ekspluatatsii ob"ektov kosmicheskoy infrastruktury. T. 1. Ob"ekty kosmicheskoy infrastruktury [Theory and practice of exploiting objects of space infrastructure. Vol. 1. Objects of space infrastructure]. Sankt-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2006. 400 p. (In Russ.).
- [31] Wu X., Liu J., Shao J., et al. Fast filling strategy of type III on-board hydrogen tank based on time-delayed method. Int. J. Hydrog. Energy, 2021, vol. 46, no. 57, pp. 29288–29296, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.094>
- [32] Dicken C.J.B., Merida W. Modeling the transient temperature distribution within a hydrogen cylinder during refueling. Numer. Heat Tr. A-Appl., 2007, vol. 53, no. 7, doi: <https://doi.org/10.1080/10407780701634383>
- [33] Arzumanov Yu.L., Khalatov E.M., Chekmazov V.I. Osnovy proektirovaniya sistem pnevmoi gidroavtomatiki [Design basics for systems of pneumatic and hydraulic automation]. Moscow, Spektr Publ., 2017. 459 p. (In Russ.).
- [34] Arzumanov Yu.L., Khalatov E.M., Chekmazov V.I., Chukanov K.P. Osnovy postroeniya matematicheskikh modeley funktsionirovaniya ustroystv pnevmavtomatiki [Basics of creating a mathematical model for functioning of pneumatic automation devices]. Moscow, Spektr Publ., 2015. 130 p. (In Russ.).

Информация об авторе

АЛИЕВ Андрей Рафаилович — инженер-конструктор первой категории. Конструкторское бюро «Арматура» — филиал АО «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» (601900, Ковров, Российская Федерация, ул. Социалистическая, д. 22, e-mail: And_88_99@mail.ru).

Information about the author

ALIEV Andrey Rafailovich — Design Engineer of 1st Category. Design Bureau «Armatura» — branch of JSC «Khrunichev State research and Production Space Center» (601900, Kovrov, Russian Federation, Sotsialisticheskaya St., 22, e-mail: And_88_99@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Алиев А.Р. Разработка методики выполнения полостей устройств пневмоавтоматики газом при пневмовакuumных испытаниях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 3, с. 103–112, doi: 10.18698/0536-1044-2022-3-103-112

Please cite this article in English as:

Aliev A.R. Development of a Technique for Filling Pneumatic Automation Device Chambers During Pneumatic Vacuum Tests. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 3, pp. 103–112, doi: 10.18698/0536-1044-2022-3-103-112



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям монографию В.Г. Цегельского «Эволюция далеких от равновесия термодинамических систем в примерах»

Проанализированы условия, определяющие процесс эволюции в изолированных и открытых неравновесных термодинамических системах. Особое внимание уделено открытым неравновесным системам, далеким от равновесия. Экспериментально-расчетным путем показано, что неравновесные процессы, протекающие в гидродинамике, теплообмене, аэродинамике, магнетизме, гетерогенных каталитических и гомогенных периодических химических реакциях, в биологических системах и ряде других, подчиняются одним и тем же закономерностям изменения состояний неравновесных термодинамических систем в процессе их эволюции. В основе этих закономерностей лежит общий принцип, сформулированный в виде аксиомы о стремлении к совершенству процессов в природе. Представлены схемы процессов эволюции неравновесных термодинамических систем, имеющих как несколько неперекрываемых, так и перекрываемых стационарных состояний. Полученные закономерности эволюции неравновесных систем применены к атмосфере Земли. Показано влияние некоторых природных и антропогенных факторов, увеличивающих производство энтропии в атмосфере и приближающих ледниковый период на Земле.

Для широкого круга научных работников, преподавателей, инженеров и аспирантов, специализирующихся в области термодинамики, физики, химии, биологии, экологии и др.

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@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>