

УДК 629.78

## **Prospects of Improvement of Descriptions of Tent-Bed Test for Control of Impermeability of Systems of Space Vehicles of Connection**

**Alexey V. Chubar<sup>a\*</sup>,  
Oleg V. Pastushenko<sup>b</sup> and Igor P. Kolchanov<sup>b</sup>**

*<sup>a</sup>Siberian Federal University*

*79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia*

*<sup>b</sup>JSC "Information Satellite Systems" Reshetnev Company"*

*52 Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia*

Received 12.08.2014, received in revised form 02.09.2014, accepted 02.10.2014

---

*The variants of application of charts of bench control of casework impermeability by gas analysis methods in the space-rocket engineering are examined. Basic descriptions of test bench for space vehicles impermeability control are presented by example of workplace of a vacuum plant of GVV-600. Decisions are given, allowing improving precision descriptions of bench for the tasks related to determination of values of actual loss of analyzed gas components from the cavities of controlled systems of the modern design-layout connection space vehicles.*

*Keywords: impermeability control, determination of actual loss.*

---

## **Перспективы улучшения характеристик испытательного стенда для контроля герметичности систем космических аппаратов связи**

**А.В. Чубарь<sup>а</sup>, О.В. Пастушенко<sup>б</sup>, И.П. Колчанов<sup>б</sup>**

*<sup>а</sup>Сибирский федеральный университет*

*Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

*<sup>б</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы*

*имени академика М.Ф. Решетнёва»*

*Россия, 662972, Железногорск, ул. Ленина, 52*

---

*Рассматриваются варианты применения в производстве ракетно-космической техники схем стендового контроля герметичности корпусных изделий газоаналитическими методами. На примере рабочего места вакуумной установки ГВУ-600 (ОАО «ИСС») представлены основные*

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

\* Corresponding author E-mail address: alexchub@mail.ru

*характеристики испытательного стенда для контроля герметичности космических аппаратов (КА). Приводятся решения, позволяющие улучшить точностные характеристики стенда для задач, связанных с определением значений фактической утечки анализируемых газовых компонентов из полостей контролируемых систем КА связи современного конструктивно-компоновочного исполнения.*

*Ключевые слова: контроль герметичности, определение фактической утечки.*

---

## **Введение**

Надежность изделий ракетно-космической техники (РКТ) напрямую связана с качеством наземной экспериментальной отработки узлов, сборочных единиц и изделия в целом, для чего оценка качества конструкции изделия, полученная в процессе заводских отработочных испытаний, должна базироваться на обоснованных, достоверных и сопоставимых результатах проводимых операций необходимого технического контроля.

Герметичность изделий РКТ – свойство изделия или его элементов, исключающее проникновение через них газообразных и (или) жидких веществ, как правило, являющихся рабочим телом агрегатов узлов и систем изделий, важный технический параметр изделия, от которого напрямую зависит его работоспособность, сохранение его заданных технических характеристик.

Основной характеристикой герметизированного изделия служит степень его герметичности – конкретная численная величина, определяемая суммарным расходом вещества через его течи [1]. Под течью, как правило, подразумевают канал или пористый участок изделия или его элементов, нарушающий их герметичность.

Принцип осуществляемого при испытаниях на герметичность технического контроля заключается в сравнении определяемого в процессе контроля значения фактической герметичности изделия с некоей количественно выраженной нормой герметичности. В случае превышения значений заданной нормы проводятся поиск и устранение значимых по величине течей. При этом обязательное условие – выполнение требования сравнения степени герметичности различных конструкций и их узлов только при равноценных условиях испытаний (давление, температура, контрольное вещество и т.д.).

Известно, что для целей технического контроля наиболее применяемыми по параметру максимальной чувствительности являются газоаналитические методы, реализуемые в виде различных способов испытаний.

Несмотря на высокую трудоемкость и стоимость, необходимость использования сложного оборудования и технологической оснастки при высокой квалификации персонала способы реализации данных методов широко распространены в ракетостроении и эффективно используются при создании космической техники в связи с повышенными требованиями к герметичности изделий отрасли [2].

Определение величины потока пробного (контрольного) газа через имеющиеся течи при реализации газоаналитических методов, как правило, производится с применением специальных приборов – течеискателей. Из большого разнообразия течеискателей наиболее приемлемыми для технологии контроля герметичности изделий РКТ по соотношению параметров чувствительности и безопасности испытаний признаны течеискатели масс-спектрометрического типа.

### **Анализ схем стендового контроля герметичности корпусных изделий РКТ**

Проведенный анализ схем технологических процессов испытаний корпусных изделий РКТ на герметичность с применением наиболее распространенного в ракетно-космической отрасли вакуумного способа контроля герметичности в барокамере с помощью масс-спектрометрических течеискателей выявил схожесть алгоритма проверок разнообразных по конструктивному исполнению элементов изделий отрасли: гермоконтейнеров, систем терморегулирования, топливных баков, систем двигательных установок и т.п.

Как правило, стенд, входящий в состав типовой структурной схемы технологического процесса испытаний на герметичность, выполняется в виде единого управляемого комплекса. При поиске аналога подобного комплекса авторами статьи рассматривался состав стенда для испытания ракетного двигателя (РД).

Согласно определению стенд для испытаний РД – это стационарное сложное комплексное сооружение с технологическим оборудованием, регулирующей и контрольно-измерительной аппаратурой, на котором производится конкретное (огневое) испытание РД.

В состав стенда входит оборудование, приборы и устройства для контроля герметичности узлов и систем РД с применением масс-спектрометрических течеискателей. С начала 1970-х гг. в состав вакуумных камер для промышленных испытаний изделий РКТ входят криогенные установки с холодильными агрегатами и криогенными экранами. Их состав и принцип работы также были проанализированы авторами.

Известно, что при глубоком охлаждении в материале конструкции происходят сложные изменения первоначальной структуры материала, сопровождающиеся изменением его физических характеристик. При этом экспериментально установлено наличие изменения характера



Рис. 1. Газодинамическая барокамера установки У-22

микродефектов как в целом материале, так и в сварных швах и разъемных соединениях. Под воздействием криогенных температур могут возникать сквозные микродефекты конструкции, механизм образования и поведения которых непредсказуем.

Существует специальная технология криогенных испытаний на герметичность с захлаживанием объекта испытаний рабочей или технологической криогенной жидкостью до заданных температур испытаний [3].

К преимуществам относится следующее:

- герметичность изделия определяется в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным, т.е. моделируются температурные деформации, а также деформации, обусловленные массой рабочей среды;
- сокращается цикл конструкторской отработки изделий, так как испытания на герметичность можно проводить непосредственно в процессе функциональных (термобалансных) испытаний.

При контроле герметичности криогенной жидкостью применяется способ вакуумирования с использованием масс-спектрометрического оборудования течеискания.

При данном способе контроля напорную полость объекта испытаний, помещенного в криостат, нагружают давлением криогенной жидкости, а полость натекания вакуумируют. При наличии дефекта в контролируемом соединении криогенная жидкость поступает в полость натекания и регистрируется масс-спектрометрическим течеискателем. В этом случае давление в полости натекания регламентировано работоспособностью масс-спектрометрического течеискателя. Давление значительно ниже давления насыщения криогенных жидкостей при температуре процесса. Обычно испытания проводят при температуре, близкой к температуре кипения среды при атмосферном давлении (объект находится в криостате, дренаж которого соединен с атмосферой). Следовательно, испарение утечки в данном случае гарантировано.

Если в качестве криогенной жидкости используется водород или азот, гелиевые течеискатели перестраивают на соответствующий газ. При этом способом вакуумирования с применением криогенной жидкости – водорода или азота – масс-спектрометрическим течеискателем регистрируются утечки  $1,3 \cdot 10^{-7} \dots 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3\text{Па/с}$ .

Порядок стендовых испытаний согласно рис. 2 следующий:

1. Монтаж испытательного стенда в соответствии с принципиальной схемой испытания на герметичность систем стенда при закрытых клапанах.
2. Заполнение криостата 1 криогенной средой.
3. Определение порога чувствительности испытаний. Для этого берут вакуумный насос 20 открывают клапаны 17, 19, 22 и 24, откачивают вакуумную систему стенда до давления 6,5 ... 10,6 Па [(5 ... 8)  $10^{-2}$  мм рт. ст.]. Закрывают клапаны 17 и 22, фиксируют установившееся показание течеискателя 23 от фонового потока водорода (азота или гелия) в системе –  $\alpha_{\text{ф}}$ . Закрывают клапан 19, открывают клапан 17, фиксируют установившееся показание течеискателя 23 от фонового потока и потока от контрольной течи 18 –  $\alpha_1$ .

Порог чувствительности испытаний рассчитывают по формуле

$$S_Q = Q_{\text{КТ}} \cdot \frac{2\Delta\alpha_{\text{ф}}}{\alpha_1 - \alpha_{\text{ф}}} \quad (1)$$

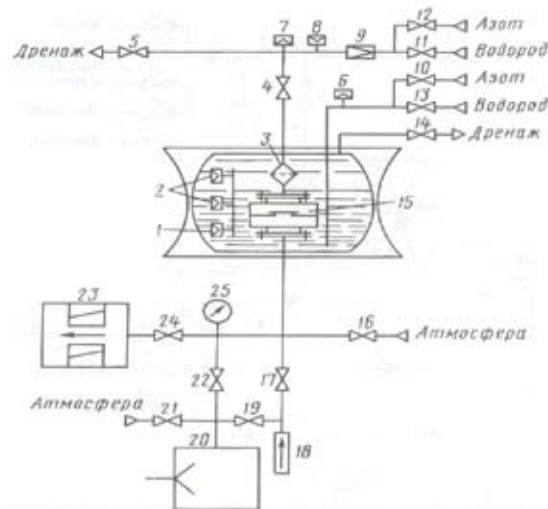


Рис. 2. Принципиальная схема стенда для криогенных испытаний способом вакуумирования в криостате

где  $S_Q$  – порог чувствительности испытаний,  $\text{м}^3 \text{Па/с}$ ;  $Q_{\text{к.т}}$  – поток водорода (азота или гелия) от контрольной течи,  $\text{м}^3 \text{Па/с}$ ;  $\alpha_\phi$  – показания течеискателя от фонового потока, В;  $\Delta\alpha_\phi$  – флуктуация фонового сигнала, В;  $\alpha_1$  – показания течеискателя от потока контрольной течи 18 и фонового потока, В.

4. Определение герметичности объекта испытаний. Закрывают клапан 17, открывают клапан 19 и откачивают вакуумную систему стенда до первоначального показания течеискателя  $\alpha'_\phi \approx \alpha_\phi$ . Заполняют объект испытаний криогенной средой (водородом, азотом или гелием), фиксируют показания течеискателя  $\alpha_x$  от потока криогенной среды из объекта испытаний.

Величину негерметичности объекта  $Q_{\text{о.и.}}$  рассчитывают по формуле

$$Q_{\text{о.и.}} = Q_{\text{к.т}} \cdot \frac{\alpha_x - \alpha'_\phi}{\alpha_1 - \alpha_\phi} \quad (2)$$

где  $Q_{\text{к.т}}$  – величина потока газообразной фазы криогенной среды от контрольной течи,  $\text{м}^3 \text{Па/с}$ ;  $\alpha_x$  – показания течеискателя от потока криогенной среды из объекта испытаний, В;  $\alpha_\phi$  – флуктуация фонового сигнала, В;  $\alpha'_\phi$  – новое показание течеискателя от фонового потока криогенной среды, В.

Применительно к испытанию на герметичность сложных герметизированных объектов РКТ, в части определения степени герметичности объекта и соотнесения полученного результата с технически требуемым, выявляется закономерное сходство вышеприведенных испытательных комплексов со схемой стендового контроля герметичности систем космических аппаратов.

### Основные характеристики испытательного стенда контроля герметичности КА

Созданный на рабочем месте вакуумной установки ГВУ-600 ОАО «ИСС» испытательный стенд – это комплексное объединение различного типа оборудования, служащее для сбора и



Рис. 3. Типовая структурная схема технологического процесса испытаний на герметичность

последующего анализа информации для испытательных систем и объектов. В большинстве случаев испытательные стенды предназначены для выяснения реакции объекта в нестандартных условиях при максимальных нагрузках. Приоритетом проведения испытаний на испытательном стенде перед экспериментами в реальных условиях является возможность оценки необходимых физических характеристик объекта, пока другие значения фиксированы и в ходе испытания не меняются. Это даёт возможность определить скрытые недостатки объектов испытательных систем.

Стенды обеспечивают повторяемость, исключая случайные и субъективные погрешности в ходе выполнения технологического процесса испытаний.

Содержание технологического процесса испытаний на герметичность описывает типовая структурная схема [4], представленная на рис. 4.

Наиболее важная характеристика испытаний на герметичность – чувствительность (минимальный поток пробного вещества, надежно регистрируемый конкретным методом испытаний). Не менее важная характеристика – точность (возможные пределы отклонений результатов, определяемых расчетным путем, от значений фактической утечки или натекания пробного вещества) [5].

Известно [6], что до последнего времени течеискатели, как и все потокомеры, не имели полноценного метрологического обеспечения и выпускались отечественной промышленностью как индикаторные приборы. Правда, в соответствующей документации имеются данные о чувствительности – отношении приращения выходного сигнала к приращению измеряемого потока пробного газа, о минимально регистрируемом потоке пробного газа и др. Но практически эти величины определялись лишь косвенно и не было гарантии правильности их количественной оценки. Вообще количественные характеристики потоков через течи представлялись ранее второстепенным дополнением к техническому сервису течеискателей. К тому же комплектование течеискателей искусственными течами, считавшимися номинально калиброванными, усиливало иллюзию, будто требования количественной оценки натеканий (утечки) удо-

влетворяются, если, пользуясь данными течами, убедиться в достаточной чувствительности течеискателя.

Однако, во-первых, методика передачи размеров единицы потока от калиброванных течей течеискателям не была отработана и содержала немало пробелов, во-вторых, сами течи нельзя было фактически считать калиброванными ввиду отсутствия образцовой (поверочной) потокометрической аппаратуры.

И только механизм ведомственной аттестация аппаратуры течеискания позволяет использовать показания течеискателей для подтверждения соответствия качества продукции отрасли.

Метрологические характеристики течеискателя – ключевого компонента технологического процесса – оказывают существенное влияние на результат и погрешность измерений. Одной из этих характеристик является функция преобразования измерительного преобразователя прибора. Течеискатель известен как прибор широкого диапазона измерений и в случае работы в статическом (с неизменяемыми основными параметрами) режиме он характеризуется градуировочной характеристикой – зависимостью выходного сигнала в номинальном режиме от входного сигнала. Безусловно, что вид функции преобразования может быть различным в зависимости от принципа действия и способов реализации средств измерений. Однако крайне важно, чтобы функция была линейной.

Кроме очевидного удобства в использовании линейная функция позволяет существенно уменьшить инструментальную составляющую погрешности. В этой связи при конструировании средств измерений применяют различные способы линеаризации функции преобразования, описания которых приведены в [7, 8]. Таким образом, наиболее простым методом повышения точности измерений, не требующим существенного усложнения аппаратуры измерений, является стабилизация градуировочной характеристики применяемых измерительных средств.

### **Пути улучшения характеристик стендового контроля герметичности КА**

Важность и разнообразие задач, стоящих перед системой контроля и испытаний на этапе отработки и на всех этапах изготовления КА, требуют повышения информативности и достоверности получаемых результатов с максимальным приближением условий проверок к эксплуатационным.

Основными задачами системы контроля и испытаний являются:

- обеспечение требуемых характеристик работоспособности изделия на основе строгого соблюдения технологии производства;
- совершенствование технологических процессов изготовления;
- повышение эффективности системы контроля;
- накопление статистических данных для количественной оценки стабильности производства и показателей надежности выпускаемых изделий.

Известно, что увеличение сроков активного существования (САС) современных КА связи приводит к ужесточению норм допустимой утечки рабочих сред систем КА до значений, граничащих с чувствительностью применяемых методов контроля. В этих условиях в расчетах

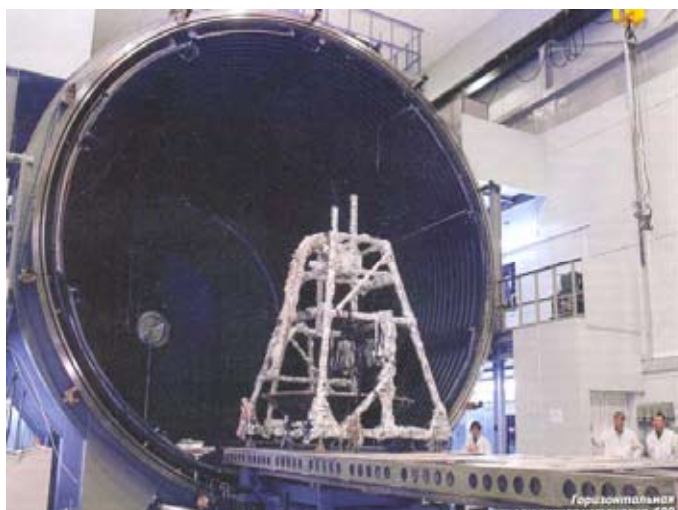


Рис. 4. Элементы конструкции КА связи в рабочем объеме ГВУ-600

норм допустимой негерметичности систем КА учитывается (рис. 4) уменьшение погрешности определения фактической утечки пробного газа в применяемых методиках испытаний на герметичность.

В настоящее время часть современных масс-спектрометрических течеискателей и мер потока контрольного газа прошла испытания для утверждения типа средства измерений с положительными результатами, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений РФ и допущена к применению.

На рис. 5 приведена схема градуировочной системы для масс-спектрометрических течеискателей, применяемая в схемах контроля герметичности для подтверждения метрологических характеристик вакуумных установок [9].

В приведенной схеме градуировку течеискателя (8) осуществляют путем сравнения выбранного (посредством переключения клапанов, 2), опорного сигнала от контрольной течи (1) с показаниями вакуумметра общего давления (3), оснащенного охлаждаемой ловушкой (4), откачиваемой механическим насосом (5) и градуированного по пробному газу.

Основное условие для обеспечения точности градуировки течеискателей по этой схеме: вакуумная установка должна обеспечивать достижение в камере (6) соответствующего вакуума (контроль – по вакуумметру 7) с низким фоновым значением парциального давления пробного газа.

В соответствии с формулами 1 и 2 в известных способах контроля вакуумированием фактором, определяющим основную погрешность величины фактической негерметичности изделия, является влияние фоновой составляющей контрольного газа в камере.

Одним из авторов настоящей статьи предложен способ, позволяющий численно разделить приращение показания прибора за счет утечки от изделия и фоновую составляющую, равную остаточной концентрации контрольного газа в вакуумной камере, фиксируемую течеискателем, и получить искомое значение фактической негерметичности изделия непосредственно при прямом измерении равного этому значению тарированного потока.



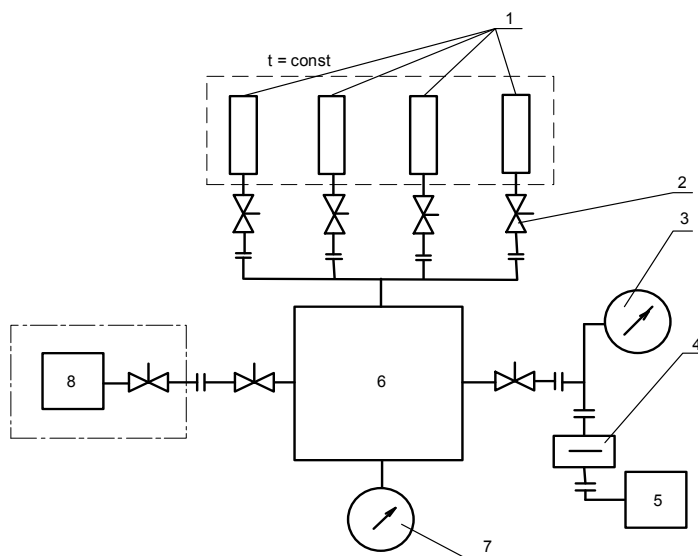


Рис. 5. Схема градуировочной системы для масс-спектрометрических течеискателей

В основу реализации способа заложен известный принцип кратности по схеме удвоения значений [10], который осуществляется за счет изменения (регулируем) величины тарированного потока контрольного газа, подаваемого в камеру и фиксируемого течеискателем.

При этом обязательным условием является обеспечение стабилизации фоновой составляющей сигнала измерительного прибора – течеискателя, которая, в свою очередь, обеспечивается за счет достижения в вакуумной камере на момент измерения равновесного давления.

Поддержанию равновесного давления в вакуумной камере способствует применение в схемах стендового контроля специальных устройств – натекателей микропотоков газа, не содержащего в своем составе контрольный газ [4].

Повышение точности регулирования подачи газа через натекатель повышает точность показаний течеискателя.

Кроме того, исключению случайных и субъективных погрешностей в ходе выполнения технологического процесса испытаний будет способствовать накопление статистических данных для количественной оценки стабильности за счет повторяемости результатов.

Производительность при этом повышается за счет сокращения времени, отводимого на операцию контроля герметичности, а сведенные при прямом измерении к минимуму погрешности расчетов устраняют необходимость перепроверок, возникающих в случае значительных расхождений результатов нескольких испытаний одних и тех же систем при установленных в существующих способах допусках на определяемую утечку.

### Заключение

Улучшение точностных характеристик стенда контроля герметичности напрямую связано с улучшением метрологического обеспечения испытаний.

Применяемые при контроле герметичности изделий РКТ способы основаны на косвенном определении искомого параметра – величины утечки пробного газа из контролируемой по-

лости изделия – сравнением значения сигнала (реакции прибора-течеискателя) от заправленного пробным газом изделия со значением сигнала от некоего эталона потока, тарированного определенным образом.

Авторами предложен к использованию в схеме стендового контроля герметичности КА способ получения искомого значения фактической негерметичности контролируемой системы непосредственно при прямом измерении равного ему значения тарированного потока.

### Список литературы

[1] *Тарасевич Р.М.* Методы и средства проверки герметичности узлов, отсеков и систем летательных аппаратов: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ им. С. Орджоникидзе, 1974. 231 с.

[2] *Гардымов Г.П., Парфенов Б.А., Пчелинцев А.В.* Технология ракетостроения: учеб. пособие. СПб.: Специальная литература, 1997. 320 с.

[3] Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т. / ред. В.В. Клюев. Т 2. Кн. 1. М.: Машиностроение, 2003. 302 с.

[4] *Горобей В.Н., Чернышенко А.А., Колчанов И.П.* // Вакуумная техника и технология. 2012. Том 22. № 4. С. 207–211.

[5] *Моисеев В.А., Тарасов В.А., Колмыков В.А., Филимонов А.С.* Технология производства жидкостных ракетных двигателей: учебник. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 688 с.

[6] *Кузьмин В.В.* // Измерительная техника. 1990. № 5. С. 34–35.

[7] Метрология, стандартизация и сертификация: учебник / ред. В.В.Алексеев. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 384 с.

[8] *Дворяшин Б.В.* Метрология и радиоизмерения: учеб. пособие. М.: Академия, 2005. 304 с.

[9] *Кузьмин В.В.* // Измерительная техника, 1997. № 2. С. 20–23.

[10] Пат. 2444713 RU. Способ контроля герметичности изделий в вакуумной камере / И.П. Колчанов, заявл. 2010130688 от 21 июля 2010.

[11] *Кузьмин В.В.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника высокого вакуума. Харьков, 1976. Вып. 1 (5). С. 3.