

УДК 629.78:533.599.2(045)

**Разработка системы управления течеискательной аппаратуры
нового поколения для отработки элементов ракетно-космической
техники**

Кологов А.В.,^{1*} Резник Ю.О.,^{2} Соловьев В.Н.,^{1*} Ушаков А.Н.,^{2***}**

Царьков К.А.^{2**}**

*¹Научно-производственное объединение "Технологии машиностроения", "НПО
"Техномаш", 3-й проезд Марьиной Рощи, 40, Москва, 127018, Россия*

*²Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

**e-mail: 250@tmnpo.ru*

***e-mail: reznik@aviatex.ru*

****e-mail: ushakov@aviatex.ru*

*****e-mail: k6472@mail.ru*

Аннотация

Предлагается решение задачи создания отраслевого течеискателя нового поколения. С учетом особенностей отраслевого течеискательного оборудования разработан опытный образец мобильного течеискателя, определен его состав и принцип работы. Приведены пневмосхема течеискателя и характеристики масс-спектрометра, входящего в его состав, а также результаты измерений и расчет функциональной зависимости потока гелия от парциального давления гелия.

Ключевые слова: течеискатель, масс-спектрометрия, вакуумирование.

Введение

Одной из важнейших задач при производстве ракетно-космической техники является обеспечение герметичности ее конструкций. Поэтому системы и элементы ракетно-космической техники проходят испытания на герметичность для того чтобы все возникшие при изготовлении течи были найдены и устранены. Для обнаружения течей могут быть использованы высокочувствительные течеискатели различного типа как отечественных, так и зарубежных производителей. Масс-спектрометрические течеискатели ТИ1-50 (завод «Измеритель» в Санкт-Петербурге) и МС-2 (ООО «НПФ Прогресс»), течеискатель серии ASM 310 (компания Pfeiffer Vacuum), а также течеискатели PHOENIXL 300 и PHOENIXL 320 (Oerlikon Leybold Vacuum GmbH) представляют собой современные надежные и высокочувствительные приборы, предназначенные для испытания на герметичность различных систем и объектов, допускающих высоковакуумную откачку внутренней полости или заполнение её гелийсодержащей смесью. Каждый из этих приборов имеет свои преимущества: устойчивость к внезапному отключению электропитания (ТИ 1-50), возможность работы в полуавтоматическом и ручном режиме (МС-2), портативность и небольшой вес (ASM 310) и другие. Известны также течеискатели, не использующие масс-спектрометр, например, водородный течеискатель на основе платиновых термokatалитических чувствительных элементов [1] или на основе сенсора из кварцевого капилляра и магниторазрядного насоса [2].

Вместе с тем, все перечисленные выше течеискатели по своим возможностям не удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к отраслевому, обладающему рядом особенностей, течеискательному оборудованию, разработка которого является предметом настоящей работы.

Основные особенности, которым должно соответствовать именно отраслевое течеискательное оборудование нового поколения, в дополнение к его высокой чувствительности и незначительной погрешности измерений заключаются в следующем:

- возможность работы со всеми контрольными газами, используемыми в отрасли при контроле герметичности;
- возможность обследования крупногабаритных емкостей, допускающих вакуумирование;
- возможность конфигурирования системы для работы на конкретном участке измерений
- интеграция в информационную сеть предприятия, при необходимости и наличии таковой.

Техническая реализация опытного образца течеискателя нового поколения

Результатом работ по разработке отраслевого течеискателя нового поколения стал опытный образец высокочувствительного масс-спектрометрического течеискательного оборудования, позволяющего работать в диапазоне от 2 до 300 атомных единиц массы (а.е.м.; $1 \text{ а.е.м.} \approx 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$), оснащенного безмасляной

форвакуумной откачной системой с производительностью 15 м³/час и работающего под управлением программно-аппаратного комплекса на основе промышленного планшетного компьютера и контроллера.

Общая погрешность определения расхода рабочего газа составляет менее 40%. Эту погрешность можно считать весьма малой, учитывая, что погрешность калибровочной течи, как правило, более 20%.

Опытный образец представляет собой многогазовый масс-спектрометрический течеискатель. Он смонтирован в промышленном электромонтажном передвижном шкафу, установленном на стойке и снабжен выносным компьютером с сенсорной панелью.

Основными составляющими течеискателя являются:

1. Откачивающая система, состоящая из двух безмасляных насосов – спирального форвакуумного насоса (ФН) и турбомолекулярного насоса (ТМН).
2. Угловые электромагнитные нормально закрытые высоковакуумные клапаны (ВК) с проходным сечением 16 и 25 мм.
3. Квадрупольный масс-спектрометрический анализатор остаточных газов Extorr ХТ-300.
4. «Стыковочный куб» (КС) – сверхвысоковакуумный объем, имеющий 6 входов, служащих для расположения электродов масс-спектрометра, входного фланца турбомолекулярного насоса, вакуумных датчиков и ввода анализируемой пробы.
5. Соединительные высоковакуумные элементы стандартов KF, CF и ISO-K.

6. Вакуумные датчики (ВД) – форвакуумный и широкодиапазонный комбинированный.

7. Программно-аппаратный комплекс управления.

Пневматическая схема установки, отображаемая на экране программно-аппаратного комплекса управления, представлена на рисунке 1. Внешний вид установки и внутреннее её наполнение показано на рисунках 2 и 3.

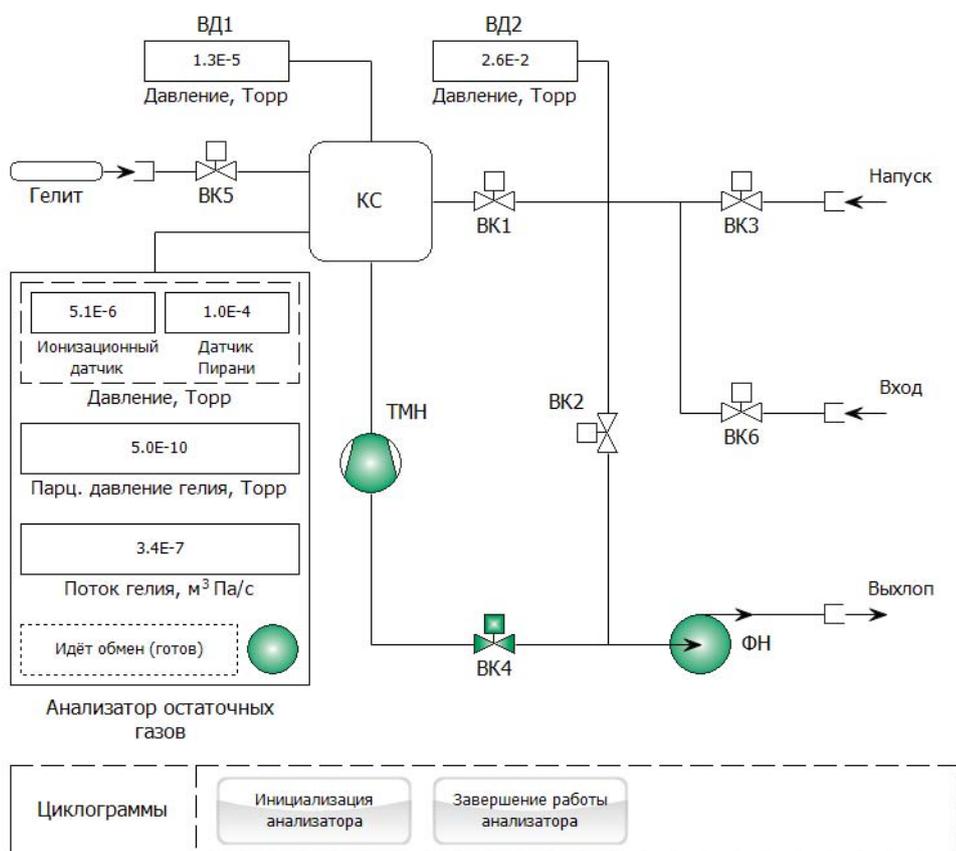


Рис. 1. Пневматическая схема установки (экран управления).



Рис. 2. Внешний вид оборудования



а)



б)

Рис. 3. Внутреннее устройство течеискателя: а) вид со стороны масс-спектрометра и стыковочных элементов, б) вид со стороны откачной системы и системы управления.

Испытываемое изделие подключается к входу течеискателя. Предварительная откачка осуществляется спиральным ФН через клапаны ВК6 и ВК2. Клапаны ВК1, ВК3 и ВК4 закрыты. При достижении вакуума не хуже 1,333 Па (10^{-2} мм.рт.ст.), регистрируемого датчиком ВД2, оборудование переключается в режим одновременной откачки ФН и ТМН через клапаны ВК1 и ВК4. По достижении вакуума не хуже 0,1333 Па (10^{-3} мм. рт. ст.) включается масс-спектрометр для проведения измерений.

Отключение и смена испытываемого изделия осуществляется после заполнения воздухом через клапан напуска ВК5. При этом клапаны ВК1, ВК2 закрыты.

При прорыве воздуха или внезапном повышении давления, контролируемом датчиками давления ВД1 и ВД2, происходит автоматическое изолирование масс-спектрометра и турбомолекулярного насоса закрытием клапанов ВК1 и ВК2.

Для проведения калибровки масс-спектрометра к течеискателю подключается калиброванная течь через клапан ВК3.

Программно-аппаратный комплекс управления течеискателем

Интеллектуальный программно-аппаратный комплекс управления течеискателем разработан на базе планшетного компьютера и промышленного контроллера. Он обеспечивает включение и выключение клапанов, насосов, считывание показаний вакуумметра и анализатора остаточных газов и принятие решения о переключении режимов работы. Реализация общего алгоритма

проведения испытания, обработка измерительных данных, хранение измерительной информации и передача, при необходимости, абонентам локальной сети осуществляется программным обеспечением (ПО) компьютера. Непосредственное управление клапанами и получение измеренных данных вакуумметров осуществляется промышленным контроллером. Такая реализация системы управления позволяет работать в реальном времени испытаний с возможностью интерактивного вмешательства оператора.

На экране компьютера изображена пневматическая схема установки (рис.1), на которой отображаются результаты измерения, состояние элементов установки и т.п. Сенсорный экран компьютера позволяет управлять испытанием без применения клавиатуры и мыши.

Процедуры пуска и завершения работы анализатора полностью автоматизированы и включают в себя регулировку клапанов (ВК1-ВК6), насосов и контроль за показаниями датчиков ВД1 и ВД2.

ПО позволяет сохранять в базе данных результаты измерений, а интерфейсы компьютера дают возможность включать установку в локальную сеть предприятия.

Обработка результатов измерений

С помощью анализатора фирмы Extorr Inc., представляющего собой масс-спектрометр, проводили измерения давления смеси гелия в камере и представляли результаты в виде распределения парциальных давлений (Торр) по а.е.м. в диапазоне от 0.5 до 300. Для определения парциального давления гелия выбираются

показания, соответствующие массе гелия с учётом размытия пика. А именно, измеряются парциальные давления в окрестности массы 4 (гелий), по которым вычисляется интегральное значение. Фильтрация фоновых и шумовых составляющих осуществляется усреднением по времени.

Поток гелия ($\text{м}^3\text{Па/с}$) определяется при помощи разработанной экспериментальной калибровочной функции вида $f(x) = \sqrt{a_1x + a_2} + a_3$. Для её построения были проведены измерения потока гелия в зависимости от парциального давления. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1.

x, давление, Торр	$8.74 \cdot 10^{-14}$	$1.51 \cdot 10^{-13}$	$1.82 \cdot 10^{-12}$	$4.76 \cdot 10^{-11}$	$9 \cdot 10^{-10}$	$1.55 \cdot 10^{-9}$	$2.4 \cdot 10^{-9}$	$4.75 \cdot 10^{-9}$
f(x), поток, $\text{м}^3 \text{Па/с}$	$6.3 \cdot 10^{-11}$	$1.1 \cdot 10^{-10}$	$1.3 \cdot 10^{-9}$	$3.4 \cdot 10^{-8}$	$6.1 \cdot 10^{-7}$	$9.48 \cdot 10^{-7}$	$1.39 \cdot 10^{-6}$	$2.65 \cdot 10^{-6}$

Сначала была построена зависимость парциального давления от потока вида $x=g(f(x))$, а затем обратная функция $y=f(x)$. Предполагаемый вид функции $g(y)$:

$$g(y) = a_1y^2 + a_2y. \quad (1)$$

Далее определялись сумма квадратов отклонений (2) и средневзвешенная сумма квадратов отклонений (3), которая используется для увеличения точности приближения при малых значениях парциального давления и потока:

$$S = [g(6.3 \cdot 10^{-11}) - 8.74 \cdot 10^{-14}]^2 + [g(1.1 \cdot 10^{-10}) - 1.51 \cdot 10^{-13}]^2 + [g(1.3 \cdot 10^{-9}) - 1.82 \cdot 10^{-12}]^2 + [g(3.4 \cdot 10^{-8}) - 4.76 \cdot 10^{-11}]^2 + [g(6.1 \cdot 10^{-7}) - 9 \cdot 10^{-10}]^2 + [g(9.48 \cdot 10^{-7}) - 1.55 \cdot 10^{-9}]^2 + [g(1.39 \cdot 10^{-6}) - 2.4 \cdot 10^{-9}]^2 + [g(2.65 \cdot 10^{-6}) - 4.75 \cdot 10^{-9}]^2, \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
S_w = & 0.9 \cdot [g(6.3 \cdot 10^{-11}) - 8.74 \cdot 10^{-14}]^2 + 0.09 \cdot [g(1.1 \cdot 10^{-10}) - 1.51 \cdot 10^{-13}]^2 + \\
& + 0.009 \cdot [g(1.3 \cdot 10^{-9}) - 1.82 \cdot 10^{-12}]^2 + 0.0009 \cdot [g(3.4 \cdot 10^{-8}) - 4.76 \cdot 10^{-11}]^2 + \\
& + 0.00009 \cdot [g(6.1 \cdot 10^{-7}) - 9 \cdot 10^{-10}]^2 + 0.000009 \cdot [g(9.48 \cdot 10^{-7}) - 1.55 \cdot 10^{-9}]^2 + \\
& + 0.0000006 \cdot [g(1.39 \cdot 10^{-6}) - 2.4 \cdot 10^{-9}]^2 + 0.0000004 \cdot [g(2.65 \cdot 10^{-6}) - 4.75 \cdot 10^{-9}]^2
\end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициенты a_1 и a_2 функции (1) определяются решением системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a_1} = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial a_2} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Были получены следующие значения коэффициентов: $a_1=172,6896$; $a_2=0,0014$.

В результате функция (1) приобретает вид:

$$g(y) = 172.6896 y^2 + 0.0014 y. \quad (5)$$

Сумма квадратов отклонений равна $S = 4.52 \cdot 10^{-20}$.

Получаем окончательный вид калибровочной функции $f(x)$:

$$f(x) = \frac{-a_2 + \sqrt{a_2^2 + 4a_1x}}{2a_1} = -4 \cdot 10^{-6} + 0.0029 \sqrt{690.758x + 1.9 \cdot 10^{-6}}. \quad (6)$$

Качественная оценка погрешности приближения представлена на рисунке 4.

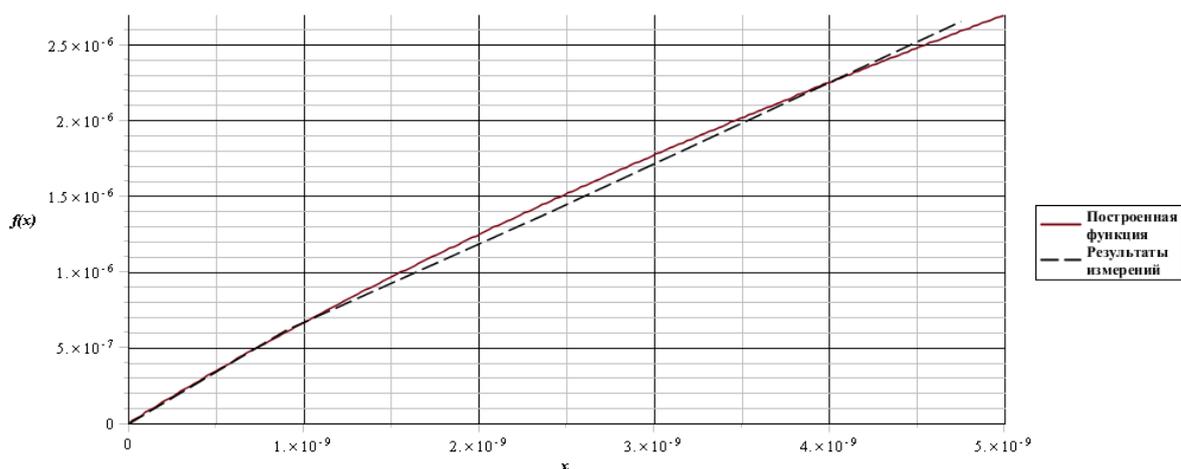


Рис. 4. Оценка точности приближения экспериментальной калибровочной функции.

Используемый анализатор Extorr XT-300 представляет собой масс-спектрометр, и поэтому течеискатель не ограничен использованием только одного газа для обнаружения утечек, хотя гелий является самым удобным газом. Можно также использовать аргон или некоторые летучие жидкости. Ниже в таблице 2 приведены коэффициенты чувствительности детектора для нескольких газов относительно азота, по которому откалиброван детектор.

Таблица 2

Газ	H ₂ O	O ₂	D ₂	H ₂	HE	Ar	N ₂	NO	CO	CO ₂	CH ₄	Kr
Коэфф. отн. чувст.	1.00	1.11	0.35	0.33	0.13	1.11	1.0	1.16	1.00	1.42	1.42	1.95

Заключение

Разработанный опытный образец течеискателя прошел предварительные испытания и показал удовлетворительные рабочие характеристики, а также

возможность использовать его в качестве отраслевого, отвечающего требованиям большинства заявленных особенностей эксплуатации.

ПО позволяет легко настраивать течеискатель на любой газ, который требуется использовать в качестве рабочего газа для определения герметичности того или иного испытываемого изделия.

Последующая отработка установки в условиях, приближенных к производственным, позволит внести необходимые изменения в его аппаратной и программной частях.

Библиографический список

1. С.Ю. Гогиш-Клушин, О.С. Гогиш-Клушина, А.В. Ельчанин, Д.Ю. Харитонов. Водородный течеискатель на основе термокаталитических чувствительных элементов для контроля герметичности замкнутых газовых объемов. // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 12. С. 10-17.
2. М.Л. Виноградов. Разработка портативного прибора контроля герметичности вакуумных систем // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности», 2013, выпуск № 3: <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2013-3/14-03-13.ttb.pdf>.