

УДК 531.73:629.76

Е. М. Алексеев¹, М. Н. Хвостов¹, Б. П. Ефимчук¹, В. П. Волков²

¹ВАТ «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», Дніпропетровськ

²ДП «ВО Південний машинобудівний завод ім. О. М. Макарова», Дніпропетровськ

Безжидкостное измерение объемов узлов ракетно-космической техники

Надійшла до редакції 14.07.08

Розглянуто методи безрідинного визначення об'ємів внутрішніх порожнин вузлів ракетно-космічної техніки та подано схеми вимірювань на їхній основі. Запропоновано шляхи удосконалення методів, спрямовані на досягнення високої точності. Приведено розрахунково-аналітичні і графічні залежності для визначення величини об'ємів і оцінки похибки вимірювань.

К настоящему времени разработан и широко используется в производстве целый ряд безжидкостных методов измерения величины объема внутренних полостей различных узлов ракетно-космической техники (РКТ). Из известных методов и устройств наиболее широкое применение нашли газодинамический, газовый ампульный и газостатический методы.

Сущность газодинамического метода заключается в том, что измеряемый объем откачивается через магистраль известной малой проводимости (с установленным дросселем), при этом фиксируется время τ истечения газа из объема. Измеряемый объем в общем случае определяется как [2]

$$V_{\text{изм}} = k_m f(\tau, p, T), \quad (1)$$

где k_m — калибровочный коэффициент откачной магистрали, $f(\tau, p, T)$ — функция времени истечения газа из объема и параметров состояния газа.

Для повышения точностных параметров газодинамического метода система оснащается, как правило, эталонной емкостью, объем которой определен с требуемой точностью. Измеряемая и эталонная емкости, заполняемые одинаковым

газом, откачиваются через одну и ту же магистраль, каждая ветвь которой содержит дроссель. При условии равенства показателей политропы газа в измеряемой и эталонной емкостях $m(\tau)_э = m(\tau)_{\text{изм}}$, а также равенства отношений начальной и конечной величин давлений в этих емкостях $(P_1/P_2)_э = (P_1/P_2)_{\text{изм}}$ величина объема определяется по формуле

$$V_{\text{изм}} = V_э \frac{\tau_{\text{изм}}}{\tau_э} \sqrt{\frac{T_{\text{изм}}}{T_э}}, \quad (2)$$

где $V_э$ — объем эталонной емкости, $\tau_{\text{изм}}$ — время истечения газа из измеряемого объема, $\tau_э$ — время истечения газа из эталонной емкости, $T_{\text{изм}}$ — усредненная температура газа в измеряемом объеме, $T_э$ — усредненная температура газа в эталонной емкости.

Схема системы измерения объема газодинамическим методом с использованием эталонной емкости представлена на рис. 1.

К недостаткам газодинамического метода следует отнести:

- относительную сложность его проведения, связанную с необходимостью изготовления и калибровки дросселя, выполняемого в виде сопла Лаваля;

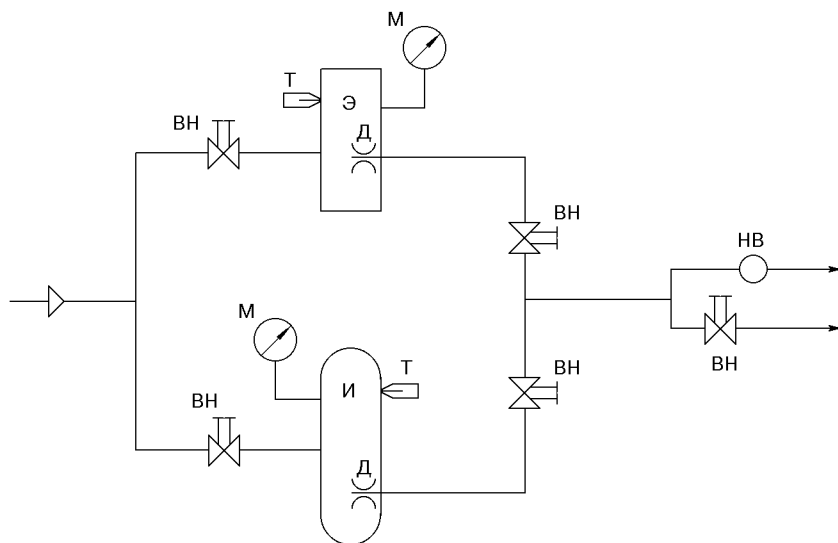


Рис. 1. Принципиальная схема системы измерения объемов газодинамическим методом: И — измеряемая емкость, Э — эталонная емкость, ВН — вентиль, М — манометр, Т — термометр, Д — дроссель, НВ — насос вакуумный

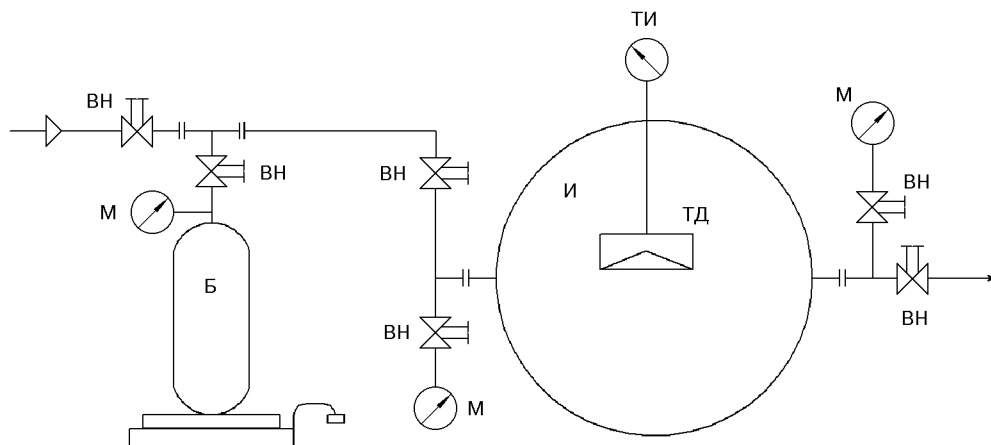


Рис. 2. Принципиальная схема системы измерения объемов газовым ампульным методом: И — измеряемая емкость, Б — баллон, ВН — вентиль, М — манометр, ТД — термодатчик, ТИ — измеритель температуры

- необходимость экспериментального определения коэффициента политропности и коэффициента сопротивления магистралей, соединяющих контролируемую емкость с дросселем;
- сходимость результатов этого метода, как любого динамического метода, представляется более низкой, чем в методах, связанных с измерением статических параметров.

Газовый ампульный метод измерения объемов замкнутых герметичных емкостей обладает довольно высокой точностью измерения. Он используется в основном для измерения объемов крупногабаритных емкостей, во внутренних полостях которых могут быть размещены датчики для измерения средней температуры в измеряемом объеме. Метод подробно изложен в отраслевом стандарте ОСТ 92-5116-89 [1].

Суть газового ампульного метода, который относится к наиболее точным методам измерения объема, состоит в следующем.

Технологический баллон (т. н. ампула) наддувается сжатым воздухом до определенного давления, определяется его масса весовым способом с допустимой погрешностью взвешивания ±0.1 г, после чего этот баллон подстыковывается к измеряемой емкости, в которой измеряются начальные значения температуры и давления, и производится перепуск сжатого воздуха из технологического баллона в измеряемую емкость (при этом масса газа, заправленного в технологический баллон, должна обеспечивать достижение давления в измеряемой емкости после перепуска не менее 1000 кПа). После перепуска производится технологическая выдержка в течение не менее 1 ч для стабилизации температуры и давления в измеряемой емкости. Затем измеряются конечные значения температуры и давления, после чего отстыковывается технологический баллон и определяется его масса, а масса газа, поступившего после перепуска в измеряемую емкость, определяется как разность между массой технологического баллона, заполненного сжатым воздухом до перепуска, и массой баллона после перепуска. Величина объема измеряемой емкости определяется по измеренным пара-

метрам давления и температуры до и после перепуска, а также по массе воздуха, поступившего в измеряемую емкость после перепуска.

Схема системы измерения объемов газовым ампульным методом представлена на рис. 2.

Как уже отмечалось выше, этот метод хорошо зарекомендовал себя при определении объемов крупногабаритных емкостей во внутренних полостях которых можно разместить датчики температуры.

Объем V измеряемой емкости вычисляют по формуле

$$V = \frac{G \cdot R \cdot Z}{\frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1}} - \frac{P_2}{P_2 - P_1} V_d - V_{тр}, \quad (3)$$

где G — масса воздуха, поступившего в емкость технологического баллона (ампулу), R — газовая постоянная воздуха, которым заправляют технологический баллон ($R = 287.096$ Дж/кг·К), Z — коэффициент сжимаемости воздуха в соответствии с графиками ОСТ 92-5116-89, T_1, T_2 — значения абсолютной температуры в измеряемой емкости до и после перепуска, P_1, P_2 — значения абсолютного давления в измеряемой емкости до и после перепуска, V_d — объемная деформация измеряемой емкости, соответствующую

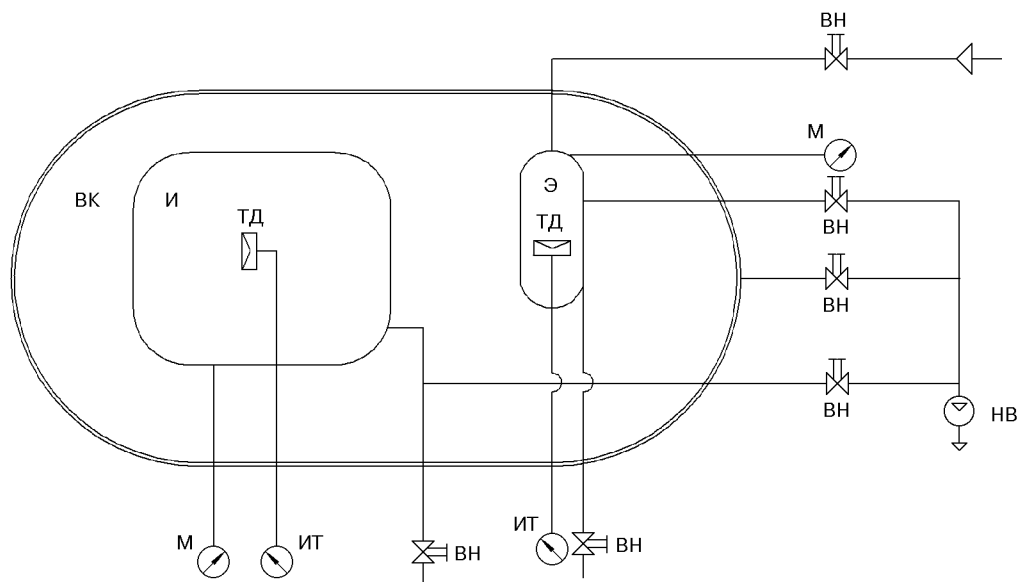


Рис 3. Принципиальная схема системы измерения объемов газостатическим методом: И — измеряемая емкость, Э — эталонная емкость, ВН — вентиль, ВК — вакуумная камера, М — манометр, НВ — насос вакуумный, ТД — термодатчик, ИТ — измеритель температуры

щая избыточному давлению наддува (определяется в соответствии с приложением к ОСТ 92-5116-89), $V_{тр}$ — объем соединительных линий.

Для определения величины объема узлов небольших размеров (например, системы термостатирования, которые все чаще применяются в ракетно-космической технике для особо точных приборных узлов, систем наведения) используется газостатический метод, основанный на перепуске газа из контролируемой емкости в эталонную и измерении начального и конечного давлений в емкостях. Этот метод в исходном состоянии менее точен, чем ампульный метод, но нашел более широкое распространение из-за своей простоты и универсальности, а его точностные характеристики можно улучшить как путем совершенствования метода, так и за счет увеличения количества контролируемых параметров. Один из путей совершенствования метода, заключающийся в вакуумировании эталонной емкости перед проведением измерений, был реализован при измерении узлов объемом до 10 литров.

Дальнейшее совершенствование этого метода направлено на повышение точностных характеристик при измерении узлов объемом до 6 м^3 с высокой упругой деформацией и базируется на

широком использовании вакуумирования как путем размещения контролируемого узла в вакуумной камере, так и удалением газов из полостей эталонной и измеряемой емкостей, что позволяет:

- расширить диапазон рабочих давлений в полости измеряемых узлов с минимизацией их деформационных изменений;
- приблизить свойства рабочей газовой среды к свойствам идеального газа путем заполнения эталонной емкости от сети высокого давления с низкой точкой росы;
- уменьшить количество контролируемых параметров (начальное давление и температура газа) после вакуумирования полостей;
- минимизировать процесс внешнего теплообмена и сократить, тем самым, время стабилизации рабочих параметров газа после перепуска.

Принципиальная схема системы измерения объемов емкостей газостатическим методом с использованием средств вакуумирования представлена на рис. 3. Датчик измерения температуры должен располагаться в геометрическом центре измеряемой полости, а в случае невозможности такого размещения в объеме устанавливаются четыре датчика, соединенные по последовательно-параллельной схеме. Величина измеряемого объема вычисляется по формуле

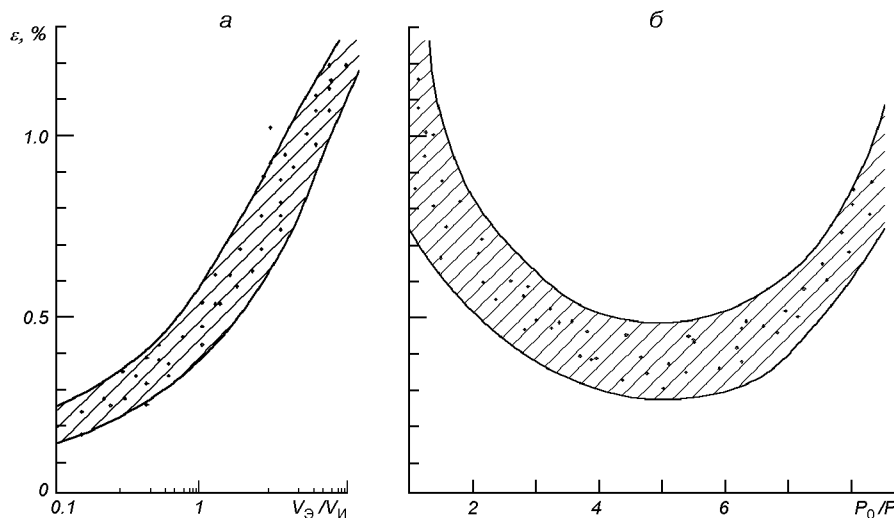


Рис. 4. Зависимость погрешности ε измерения объема: *a* — от соотношения объемов эталонной и измеряемой емкостей, *б* — от соотношения начального и конечного давлений

$$V_{\text{изм}} = V_0 T_x \left(\frac{P_0}{P \cdot T_0} - \frac{1}{T_0} \right) - V_{\text{тр}}, \quad (4)$$

где $V_{\text{изм}}$ — объем измеряемой полости, V_0 — объем эталонной емкости, T_x — температура газа в измеряемой полости, T_0 — исходная температура газа в эталонной емкости, T_0 — стабилизированная температура газа в эталонной емкости после перепуска, P_0 — исходное давление газа в эталонной емкости, P — давление газа в полостях после перепуска, $V_{\text{тр}}$ — объем соединительных трубопроводов.

Результаты расчетно-аналитической оценки погрешности измерения объемов газостатическим методом, зависящей от погрешностей измерения объема эталонной емкости и параметров газа до и после перепуска, показывают (рис. 4), что высокий уровень точности 0.2 % может быть достигнут при использовании эталонной емкости объемом 0.1—0.3 от величины измеряемого объема, а соотношение давления газа до и после перепуска должно быть в пределах 3—5.

ВЫВОДЫ

1. Имеющийся арсенал безжидкостных методов определения объемов замкнутых полостей вполне достаточен для решения любых производ-

ственных задач как по точностным характеристикам, так и по производственно-технологическим показателям.

2. Усовершенствованный на основе использования средств вакуумирования газостатический метод также обеспечивает достижение высоких точностных характеристик процесса и может быть использован для определения объемов конструктивно неограниченных изделий в любой отрасли техники.

1. ОСТ 92-5116-89. Емкости герметичные изделий. Типовой технологический процесс измерения объемов газовым ампульным методом. — Введ. 01.07.90 до 30.06.12.
2. ОСТ 92-5136-90. Емкости герметичные изделий. Типовой технологический процесс контроля объемов газодинамическим методом. — Введ. 01.01.92 до 30.06.12.

NON-LIQUID MEASUREMENT OF VOLUMES OF UNITS OF SPACE AND MISSILE TECHNOLOGY

E. M. Alexeev, M. N. Khvostov, B. P. Efimchuk, V. P. Volkov

We consider the existing methods for non-liquid determination of volumes of interior cavities of the units of space and missile technology and present process measurement schemes. Some ways to improve the methods are offered to achieve high-precision characteristics of measurements. Analytic-calculated and graphic relationships for determination of volumes and estimation of errors of measurements are given.