



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО  
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
ИМ. АКАДЕМИКА С.И. ВАВИЛОВА

---

ЗАОЧНЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ПОВЫШЕНИЯ  
ВАЛИФИКАЦИИ  
ИТР

Л.Е. ЛЕВИНА, В.В. ПИМЕНОВ

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА  
КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ  
ВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
И ИЗДЕЛИЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

---

ЦЕНТРАЛЬНОЕ ПРАВЛЕНИЕ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА  
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
им. академика С.И. ВАВИЛОВА

---

ЗАОЧНЫЙ ИНСТИТУТ

---

Курсы повышения квалификации ИТР по  
вакуумному аппарато- и приборостроению (II концентр)

Л.Е. ЛЕВИНА, В.В. ПИМЕНОВ

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ  
ВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И  
ИЗДЕЛИЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ



Москва "Машиностроение" 1985

Редакционно-методический совет:

В.П. Борисов, В.В. Голоскоков, Н.И. Гореликов,  
В.С. Коган, В.В. Леонов, А.К. Ребров, Л.Н. Розанов,  
В.Я. Плисковский (рецензент), Л.Г. Садиков (от-  
ветственный за выпуск), Г.Л. Саксаганский (пред-  
седатель), А.Б. Цейтлин

Левина Л.Е., Пименов В.В.

Методы и аппаратура контроля герметичности  
вакуумного оборудования и изделий приборострое-  
ния. – М.: Машиностроение, 1985 – 72 с.

В связи с задачами получения и сохранения  
необходимого вакуума, обеспечения работоспособ-  
ности вакуумного оборудования и изделий приборо-  
строения в лекции рассмотрены общие положения  
и основные понятия техники течеискания, методы  
и способы испытаний на герметичность.

Дано краткое описание течеискательного обо-  
рудования. Приведены его основные характери-  
стики. Даны рекомендации по обеспечению эффек-  
тивности контроля герметичности.

Табл. 2, ил. 14, список лит. 7 назв.

Выпущено по заказу Заочного института повы-  
шения квалификации ИТР ЦП НТО приборострои-  
тельной промышленности им. академика С.И. Вави-  
лова.

© Заочный институт повышения квалификации ИТР  
Центрального правления НТО приборостроительной  
промышленности им. академика С.И. Вавилова,  
1985 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших условий получения и сохранения заданной среды в рабочих объемах различных систем и изделий является герметичность их конструкций. В вакуумной технике герметизация осуществляется ради получения и сохранения необходимого вакуума, в приборостроении — для защиты рабочих элементов от вредных воздействий окружающей среды или для предупреждения замещения газа-заполнителя воздухом. Контроль герметичности относится к числу испытаний, необходимых для того, чтобы обеспечить нормальное функционирование герметизированных объектов.

Под герметичностью понимают непроницаемость конструкции для газов и жидкостей. Абсолютная герметичность недостижима и неконтролируема. Поэтому герметичными принято считать конструкции, газовый или жидкостный обмен через элементы которых достаточно мал для того, чтобы не мешать нормальному ходу рабочего процесса или сохранения требуемых характеристик герметизированного изделия в процессе всего срока его службы, включая и время хранения. Требования к степени герметичности (нормы герметичности) устанавливаются исходя из назначения, особенностей конструкции, срока службы, условий работы и хранения герметизированных объектов. Нормы герметичности определяют круг методов и приборов (течекскатеров), принципиально пригодных для испытаний данного объекта. Однако для окончательного выбора того или иного метода или прибора приходится учитывать ряд дополнительных условий, таких, как возможность обеспечения необходимой надежности испытаний, требуемой производительности, экономической рентабельности.

Ясное представление о возможностях и особенностях существующих методов и аппаратуры контроля герметичности создатели герметизированных изделий и оборудования должны иметь не только в связи с правильным выбором испытательного оборудования, но и для того, чтобы при проектировании задавать технически выполнимые требования к контролю. Следует учитывать при этом, что низкая надежность контроля герметичности или высокая его трудоемкость могут явиться следствием недостаточно продуманной конструкции самого испытываемого объекта, например отсутствия доступа к гермети-

зирующим швам и уплотнительным элементам, невозможности создания оптимальных условий работы течеискательной аппаратуры. При разработке технологии изготовления герметизируемых объектов важно правильно установить стадию технологического процесса, на которой следует производить контроль герметичности для того, чтобы избежать временной закупорки течей, препятствующей их обнаружению, или образования новых течей в уже проверенных конструкциях.

Предлагаемая лекция имеет целью познакомить читателей с основными положениями техники контроля герметичности, дать представление о принципиальных особенностях и технических возможностях применяемых в ней методов и аппаратуры и о способах их эффективного применения при контроле герметичности вакуумного оборудования и изделий приборостроения.

## 1. ТЕХНИКА ТЕЧЕИСКАНИЯ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 1.1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ НАРУШЕНИЙ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

Нарушение герметичности конструкции может определяться наличием в ней течей или проницаемостью отдельных ее элементов. Природа проницаемости и течей, а соответственно и методы их обнаружения, различны. Течь – это свободный от посторонних включений канал или пористый участок перегородки, через который могут проникать газы и жидкости. Проницаемость – это свойство самого материала, обусловливаемое процессами растворения в нем и диффузии газообразных или жидких веществ. Проницаемость носит избирательный характер. Кварцевое стекло, например, проницаемо для гелия, некоторые металлы – для водорода. Серебро пропускает кислород. Детали из различных сортов резины проницаемы для многих газов и т.д. Проникновение через течи обычно происходит значительно быстрее, чем через сплошной материал. Указанные различия, как правило, исключают возможность одновременного обнаружения обоих видов нарушений герметичности в ходе оперативного производственного контроля. Поэтому при контроле герметичности решается только задача обнаружения течей, возникающих в результате нарушения технологии или низкого ее качества. Проницаемость, как органическое свойство материалов, должна исключаться правильным их выбором при конструировании. В случае, если речь идет о применении новых материалов, сведения о проницаемости ко-

торых отсутствуют, необходимой оказывается постановка специальных исследований для ее определения.

Поскольку контроль герметичности в условиях производства и эксплуатации разнородных систем и изделий проводится с целью выявления течей, комплекс методов, аппаратуры и способов контроля принято называть "техникой течеискания".

## 1.2. ЗАДАЧИ ТЕХНИКИ ТЕЧЕИСКАНИЯ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

В самом общем виде задачи техники течеискания могут быть сформулированы следующим образом:

- определение качества герметизации объекта испытаний в целом для установления его соответствия предъявляемым требованиям;

- выявление негерметичных узлов, деталей или отдельных участков оболочки объекта;

- определение местонахождения течей с целью их последующего устранения или для выявления причин их появления.

Испытания сложных герметизированных объектов, как правило, целесообразно проводить в последовательности, определенной приведенным перечнем. Если на первом этапе испытаний установлена герметичность объекта, они прекращаются. Испытания второго этапа позволяют существенно сократить объем наиболее трудоемких работ по поиску течей. Кроме того, уменьшается опасность пропуска течей вследствие утомления оператора. Если квалифицированный специалист выделил ограниченный негерметичный участок, процедуру поиска можно далее поручить оператору любой квалификации.

В случае объектов сложной конструкции, содержащих большое количество герметизированных узлов и деталей, или при большой вероятности нарушений герметичности отдельных частей объекта, целесообразна предварительная поузловая проверка. Она может потребовать значительных затрат труда и времени, применения специальной оснастки, а в некоторых случаях и оборудования специального участка для проведения испытаний узлов и деталей. Однако такие затраты обычно окупаются сокращением времени испытаний и ввода в действие собранного объекта.

В массовом производстве герметизированных изделий, имеющих сравнительно небольшую стоимость, при малой вероятности течей до сборки, например в производстве полупроводниковых приборов, герметизированных радиодеталей и т.д.,

общая проверка герметичности готовой продукции является, как правило, единственным испытанием качества герметизации в производственном процессе. Это не исключает, однако, целесообразности разработки и совершенствования методов и приборов для точного установления местонахождения течей в подобных изделиях, поскольку они необходимы для отлаживания технологии герметизации, анализа брака массовой продукции и оперативного выявления слабых звеньев технологического процесса.

Все способы течеисскания базируются на регистрации протекающих через течи веществ. В большинстве случаев это специально подобранное пробное вещество (ПВ) - пробный газ (ПГ) или пробная жидкость (ПЖ), которое может быть избирательно обнаружено выбранным методом течеисскания. Иногда, как например при пузырьковых испытаниях, фиксируется перетекание через течь обычного воздуха. Натекание воздуха в вакуумные системы может быть обнаружено с помощью масс-спектрометрических измерителей парциальных давлений, которыми часто снабжаются вакуумные системы (по характерным пикам азота, кислорода, аргона). Для интенсификации перетекания ПВ через течь в процессе испытаний на контролируемой оболочке создается перепад давлений. Направление перепада по-возможности должно совпадать с рабочим. Если выявляются натекания газов или жидкостей, как правило, проводятся испытания с вакуумированием внутренней полости объекта, соединяемой с течеискателем. ПВ при этом подается извне. В зависимости от этапа испытаний ПГ может быть подан путем обдува, или с помощью чехлов и камер, охватывающих изделия в целом или по частям. При поиске мест течей обдуватель, создающий направленную струю ПГ, перемещается над контролируемой поверхностью; возможно смачивание отдельных участков поверхности ПЖ.

Для обнаружения утечек ПВ в чистом виде или в составе смеси вводится во внутреннюю полость изделия, причем, либо внутри создается избыточное давление, либо извне - вакуум. В первом случае ПГ засасывается в течеискатель из атмосферы над испытываемой оболочкой с помощью шупа. Возможно накопление ПГ в чехлах. Во втором случае изделия помещаются в вакуумные камеры или на их поверхности размещаются вакуумируемые присоски, соединяемые с течеискателем. Капиллярные и химические методы позволяют фиксировать утечки ПВ, в основном - ПЖ, по видимым следам, образуемым на испытываемой поверхности.

Специфическим оказывается способ подачи ПВ на подде-

жащие испытаниям замкнутые оболочки, к внутренней полости которых доступа нет. Изделия размещаются в камере, где подвергаются избыточному давлению ПВ (опрессовываются). ПВ проникает через течи в негерметичные изделия. Проникновение ПВ в негерметичные изделия может быть обнаружено различными способами. Иногда фиксируется присутствие ПВ непосредственно в объеме полости (радиоактивный, параметрический методы). В некоторых случаях для обнаружения течей изделия вскрываются (капиллярные методы). Но в большинстве случаев проникновение ПВ внутрь изделий фиксируется по его последующей утечке. Для этого наружные поверхности изделий, изъятых из опрессовочного устройства, посредством обдува воздухом или прогревом очищают от сорбированного при опрессовке ПВ, после чего изделия помещают в вакуумируемую камеру, соединяемую с течеискателем. Характерной особенностью таких испытаний является ограничение диапазона обнаруживаемых течей не только со стороны малых, но и больших величин. Верхняя граница диапазона определяется потерей ПВ через большие течи до момента контроля.

### 1.3. СПОСОБЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ТЕЧЕЙ

Поскольку формы и размеры каналов течей разнообразны и не поддаются описанию, течи принято характеризовать количественно расходом протекающих через них газообразных или жидких веществ. В случае жидкостей говорят об объемном или массовом расходе. При заданной (обычно комнатной) температуре расход (поток) газа в международной системе единиц измерения СИ задается в  $\text{м}^3/\text{Па}\cdot\text{с}$  или в ваттах. Эквивалентность этих единиц явствует из следующих простейших преобразований:

$$\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2; \text{м}^3/\text{Па}\cdot\text{с} = \text{Дж}/\text{с} = \text{Вт}.$$

Это равенство определяет возможность характеризовать количество газа (при нормальной температуре) как произведением его давления на занимаемый объем, так и запасенной в данном количестве газа энергией.

Поскольку в отечественной и зарубежной литературе по контролю герметичности еще встречаются различные внесистемные единицы измерения газовых потоков, ниже приводится табл. 1, дающая пересчетные коэффициенты от одних единиц к другим.



Таблица 1

Единицы измерения газовых потоков и соотношения между ними

| Единицы измерения                    | $\text{м}^3 \text{Па/с}$<br>(Вт) | $\text{см}^3 \text{атм/с}$ | л мм рт.ст/с        | л мм рт.ст/с        | $\frac{\text{мм}^3 \text{атм}}{\text{с}}$ |
|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| $\text{м}^3 \text{Па/с (Вт)}$        | 1                                | 10                         | 7,6                 | $7,6 \cdot 10^3$    | $10^4$                                    |
| $\text{см}^3 \text{атм/с}$           | $10^{-1}$                        | 1                          | $7,6 \cdot 10^{-1}$ | 760                 | $10^3$                                    |
| $\frac{\text{л мм рт.ст}}{\text{с}}$ | $1,32 \cdot 10^{-1}$             | 1,32                       | 1                   | $10^3$              | $1,32 \cdot 10^3$                         |
| $\frac{\text{л мм рт.ст}}{\text{с}}$ | $1,32 \cdot 10^{-4}$             | $1,32 \cdot 10^{-3}$       | $10^{-3}$           | 1                   | 1,32                                      |
| $\text{мм}^3 \text{атм/с}$           | $10^{-4}$                        | $10^{-3}$                  | $7,6 \cdot 10^{-4}$ | $7,6 \cdot 10^{-1}$ | 1                                         |

Для однозначности характеристики течей и возможности сопоставления степени герметичности оболочек, испытываемых и работающих в различных условиях, вводится понятие величины течи В, относимое к нормализованным условиям. Течь В характеризуется потоком воздуха, перетекающего через нее из атмосферы в вакуум (давление ниже 10 Па) при комнатной температуре.

Соотношение между нормализованными величинами течей и потоками  $Q$ , перетекающих через них произвольных газов, отличных от воздуха, при перепадах давлений, отличающихся от нормализованных, определяется обычно путем оценочных пересчетов, базирующихся на формулах Кнудсена и Пуазейля, соответственно для молекулярного и вязкостного режимов течения (см. далее (6)-(9)). В первом случае расчетное уравнение имеет вид

$$\frac{V_M}{Q_M} = \sqrt{\frac{M}{M_V}} \frac{P_a}{P_2 - P_1}, \quad (1)$$

во втором

$$\frac{V_{вз}}{Q_{вз}} = \frac{\eta}{\eta_V} \frac{P_a^2}{P_2^2 - P_1^2}, \quad (2)$$

где  $P_a$  - атмосферное давление;  $P_2$  - давление на входе в канал течи,  $P_1$  - на выходе;  $\eta$  и  $\eta_V$  - динамическая вязкость произвольного газа и воздуха, соответственно;  $M$  и  $M_V$  - соответственно молекулярная масса произвольного газа и воздуха; индексы "вз" и "м" относят величины, соответственно, к вязкостному и молекулярному режимам течения. Достоверность расчетных оценок по уравнениям (1) и (2) ограничивается неопределенностью геометрии каналов течей и режимов течения через них. При расчетах течи моделируются прямыми каналами круглого или сильно вытянутого прямоугольного сечений (соответственно они именуются течами типа пор или трещин). Режим течения оценивается исходя из возможности соотношения между характерным размером канала ( $r$  или  $\delta$ ) и средней длиной свободного пробега молекул  $\lambda$ . Последняя для воздуха при  $T=293K$  может быть приближенно определена по формуле

$$\lambda \approx \frac{0.67}{P}, \quad (3)$$

Таблица 2

Характерные размеры  $r$  и  $\delta$  различных течей В в оболочках толщиной  $l$

Для круглого канала радиуса  $r$ :  $Z = V l$  (м<sup>3</sup>Па/с) · см;

$X = V l$  (л мкм рт.ст/с) · см.

Для трещин с раскрытием  $\delta$  и протяженностью  $h$ :

$Z = V \frac{l}{h}$  м<sup>3</sup>Па/с;  $X = V \frac{l}{h}$  л мкм рт.ст/с.  $l$  и  $h$  - в см

| $Z$                  | $X$                 | $r$ см              | $\delta$ , см       |
|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $1,3 \cdot 10^{-12}$ | $1,0 \cdot 10^{-8}$ | $5,0 \cdot 10^{-6}$ | $2,1 \cdot 10^{-8}$ |
| $6,7 \cdot 10^{-12}$ | $5,0 \cdot 10^{-8}$ | $8,5 \cdot 10^{-6}$ | $4,6 \cdot 10^{-8}$ |
| $1,3 \cdot 10^{-11}$ | $1,0 \cdot 10^{-7}$ | $1,1 \cdot 10^{-5}$ | $6,5 \cdot 10^{-8}$ |
| $6,7 \cdot 10^{-11}$ | $5,0 \cdot 10^{-7}$ | $1,8 \cdot 10^{-5}$ | $1,5 \cdot 10^{-7}$ |
| $1,3 \cdot 10^{-10}$ | $1,0 \cdot 10^{-6}$ | $2,2 \cdot 10^{-5}$ | $2,1 \cdot 10^{-7}$ |
| $6,7 \cdot 10^{-10}$ | $5,0 \cdot 10^{-6}$ | $3,7 \cdot 10^{-5}$ | $4,7 \cdot 10^{-7}$ |
| $1,3 \cdot 10^{-9}$  | $1,0 \cdot 10^{-5}$ | $4,5 \cdot 10^{-5}$ | $6,5 \cdot 10^{-7}$ |
| $6,7 \cdot 10^{-9}$  | $5,0 \cdot 10^{-5}$ | $7,2 \cdot 10^{-5}$ | $1,5 \cdot 10^{-6}$ |
| $1,3 \cdot 10^{-8}$  | $1,0 \cdot 10^{-4}$ | $8,8 \cdot 10^{-5}$ | $2,1 \cdot 10^{-6}$ |
| $6,7 \cdot 10^{-8}$  | $5,0 \cdot 10^{-4}$ | $1,4 \cdot 10^{-4}$ | $4,6 \cdot 10^{-6}$ |
| $1,3 \cdot 10^{-7}$  | $1,0 \cdot 10^{-3}$ | $1,7 \cdot 10^{-4}$ | $6,4 \cdot 10^{-6}$ |
| $6,7 \cdot 10^{-7}$  | $5,0 \cdot 10^{-3}$ | $2,6 \cdot 10^{-4}$ | $1,4 \cdot 10^{-5}$ |
| $1,3 \cdot 10^{-6}$  | $1,0 \cdot 10^{-2}$ | $3,1 \cdot 10^{-4}$ | $1,9 \cdot 10^{-5}$ |
| $6,7 \cdot 10^{-6}$  | $5,0 \cdot 10^{-2}$ | $4,8 \cdot 10^{-4}$ | $4,1 \cdot 10^{-5}$ |
| $1,3 \cdot 10^{-5}$  | $1,0 \cdot 10^{-1}$ | $5,7 \cdot 10^{-4}$ | $5,5 \cdot 10^{-5}$ |
| $6,7 \cdot 10^{-5}$  | 0,5                 | $8,7 \cdot 10^{-4}$ | $1,1 \cdot 10^{-4}$ |
| $1,3 \cdot 10^{-4}$  | 1,0                 | $1,0 \cdot 10^{-3}$ | $1,4 \cdot 10^{-4}$ |
| $6,7 \cdot 10^{-4}$  | 5,0                 | $1,5 \cdot 10^{-3}$ | $2,7 \cdot 10^{-4}$ |
| $1,3 \cdot 10^{-3}$  | 10,0                | $1,8 \cdot 10^{-3}$ | $3,5 \cdot 10^{-4}$ |
| $1,3 \cdot 10^{-2}$  | 100,0               | $3,3 \cdot 10^{-3}$ | $7,9 \cdot 10^{-4}$ |
| $6,7 \cdot 10^{-2}$  | 500,0               | $4,9 \cdot 10^{-3}$ | $1,4 \cdot 10^{-3}$ |

| Z    | X       | $\Gamma$ , см       | $\delta$ , см       |
|------|---------|---------------------|---------------------|
| 0,1  | 1000,0  | $5,9 \cdot 10^{-3}$ | $1,7 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,67 | 5000,0  | $8,8 \cdot 10^{-3}$ | $3,0 \cdot 10^{-3}$ |
| 1,3  | 10000,0 | $1,1 \cdot 10^{-2}$ | $3,8 \cdot 10^{-3}$ |

где  $\lambda$  выражена в см, а среднее давление на канале  $P$  - в Па;  $\Gamma$  - радиус канала течи типа поры,  $\delta$  - узкая сторона сечения течи типа трещины.

Ошибка в оценках  $B$  от неправильно выбранного режима может быть значительной для круглых каналов в соответствии с соотношением

$$\frac{B_{B3}}{B_M} \approx 1,1 \text{ ч}, \quad (4)$$

где радиус течи выражен в микрометрах [4]. В связи с этим правильной пользоваться при расчетах обобщенным уравнением Кнудсена. В упрощенном виде, обеспечивающем точность расчетов, приемлемую для техники течения, оно имеет вид

$$Q = Q_M + Q_{B3}, \quad (5)$$

где

$$Q_{Mo} = \frac{2\pi r^3}{3} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} (P_2 - P_1); \quad (6)$$

$$Q_{M\equiv} = \frac{2h\delta^2}{3l} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} (P_2 - P_1); \quad (7)$$

$$Q_{B3o} = \frac{\pi r^4}{16\eta l} (P_2^2 - P_1^2); \quad (8)$$

$$Q_{B3\equiv} = \frac{h\delta^3}{24\eta l} (P_2^2 - P_1^2). \quad (9)$$

Помимо уже определенных ранее величин в уравнениях (6)-(9) входят:  $l$  - длина канала течи (приближенно при-

мается равной толщине оболочки);  $h$  - длинная сторона трещинообразного сечения;  $R$  - универсальная газовая постоянная,  $T$  - температура. Индекс "О" относит зависимости к течениям типа пар, "□" - к трещинообразным течениям. Из уравнения (5) не могут быть получены простые соотношения типа (1) и (2), поскольку в него входят члены суммы, содержащие характерные размеры каналов в различных степенях. Требуется пересчет на ЭВМ. По результатам таких расчетов получена удобная для практики табл. 2, позволяющая оценить характерные размеры течей различных величин  $B$ .

#### 1.4. ФОРМУЛИРОВКА ТРЕБОВАНИЙ К ГЕРМЕТИЧНОСТИ

Необходимая чувствительность испытаний определяется требованиями к степени герметичности изделий, которые рассматриваются по приводимым ниже формулам. Если герметизация осуществляется ради сохранения вещества, заполняющего герметизированное изделие, поддержания неизменными его давления или состава, то предельно допустимые потоки  $Q_{\text{доп}}$  веществ, протекающих через течи, определяются по формулам

$$Q_{\text{доп}} \leq \frac{Q_{\text{доп}}}{t} \quad \text{или} \quad Q_{\text{доп}} \leq \frac{\Delta p V}{\gamma t}, \quad (10)$$

где  $Q_{\text{доп}}$  - предельно допустимая потеря вещества;  $t$  - заданное время хранения;  $\Delta p$  - допустимое изменение парциального давления компонента газовой среды в объеме  $V$  изолированной полости;  $\gamma$  - объемная концентрация критического компонента в перетекающей смеси.

Для того, чтобы при нагнетании или откачке газа со скоростью  $S$  иметь возможность получать и поддерживать в системах определенные давления  $P$  общие или парциальные, системы должны быть герметичными в пределах

$$Q_{\text{доп}} \leq \frac{1}{\gamma} P S. \quad (11)$$

Приведенные зависимости (10) и (11) определяют требования к герметичности конструкции в целом. При организации поэлементного контроля можно исходить из предположения о равномерном распределении течей по площади поверхности или по длине уплотняющих соединений. Соответственно в этом случае следует пользоваться зависимостями

$$Q_i \leq \frac{Q_{\text{доп}}}{F} F_i \quad \text{или} \quad Q_i \leq \frac{Q_{\text{доп}}}{l} l_i. \quad (12)$$

где  $Q_i$  – предельно допустимый поток через  $i$ -тый элемент площади  $F_i$ , или с протяженностью соединений  $l_i$ ;  $Q_{\text{доп}}$  – предельно допустимый суммарный поток через оболочку изделия с общей площадью поверхности  $F$  и длиной соединений  $l$ . Однако опыт показывает, что в большинстве случаев течи приурочиваются к разборным и неразборным соединениям и носят дискретный характер. Следовательно, требования к чувствительности испытаний, определяемые исходя из зависимостей (12), скорее всего существенно завышаются. Поэтому в случаях, когда речь не идет об особо высоких требованиях к надежности подлежащих контролю изделий, испытания элементов можно проводить с чувствительностью, не более чем на порядок превосходящей чувствительность испытания объекта в целом. При изготовлении высоконадежных изделий снизить требования к чувствительности испытаний, по сравнению с определяемой выражениями (12), можно исходя из вероятностного распределения течей по величинам, определяемого в процессе разработки технологии. Как правило, во всяком случае при трещинообразной их форме, течи меньше  $10^{-10}$  м<sup>3</sup> Па/с мало вероятны.

### 1.5. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ НЕВЫЯВЛЕНИЯ ТЕЧЕЙ. ВНУТРЕННИЕ ТЕЧИ

Поскольку герметизация является условием работоспособности вакуумируемых систем и изделий, необходимо обеспечение высокой надежности испытаний на герметичность. Однако даже после самых тщательных испытаний возможны отказы, связанные с нарушением герметичности. Это может объясняться несколькими причинами. Первая из них – превращение несквозных дефектов в сквозные под действием остаточных напряжений или в результате различных физико-химических воздействий. Предупредить подобные отказы можно только путем отработки конструкции и технологии изготовления изделий по результатам ускоренных испытаний, имитирующих длительные сроки хранения и эксплуатации.

Вторая причина – исчезновение и появление течей в результате деформации оболочки. Как показывает опыт, даже в достаточно толстых и жестких оболочках течи способны открываться и закрываться или изменять свою величину в зависимости от изменения направления и величины силовой нагрузки на оболочку. Особенно резко этот эффект сказывается

при проверке изделий с тонкостенными оболочками, например силфонных и мембранных подвижных элементов.

Деформация оболочек с изменением течей может происходить в результате не только механических, но и термических воздействий. Известно, например, что течи в охлаждаемых стаканах азотных ловушек, регистрируемые при захолаживании, часто исчезают при комнатных температурах, причем плавно и воспроизводимо меняют свою величину при плавном изменении температуры.

Таким образом, для надежного выявления течей, могущих сказаться на работоспособности изделий, все оболочки и, во всяком случае, оболочки изделий ответственного назначения крайне желательно испытывать в условиях, максимально приближенных к условиям их работы и хранения.

И, наконец, третья причина возможного невыявления течей связана с их частичным или полным перекрытием, которое может быть (и часто является) временным. Перекрытие каналов течей малого сечения может происходить в результате попадания в них пылинок, механических загрязнений или закупорки их жидкостями. Однако, как показывает практика [1], наиболее вероятно перекрытие течей под воздействием влаги воздуха. В упомянутой работе найдено, что при относительной влажности окружающей атмосферы 30-40% в металл-керамических соединениях за неделю перекрывается до 25% всех течей величиной  $10^{-6}$ - $10^{-10}$  м<sup>3</sup>Па/с, а при влажности 60-70% - до 75% таких течей. Эксперименты показали, что течи могут находиться в закупоренном состоянии длительное время, от нескольких недель до нескольких месяцев, причем это время совершенно не зависит от исходной величины течи. Наблюдалось не только полное перекрытие течей под воздействием атмосферной влаги, но и частичное, с уменьшением их величины в 100-1000 раз.

Герметизация течей случайными посторонними включениями ненадежна. Не обнаруженные во время испытаний закупоренные течи могут вскрыться в неконтролируемый момент времени. В связи с этим особое значение приобретает правильный выбор этапа испытаний и подготовка к ним изделий. Испытания должны проводиться с учетом технологических операций, могущих приводить к перекрытию течей, или, наоборот, разгерметизации. Испытания должны предшествовать окраске поверхностей и нанесению покрытий, если эти покрытия не применяются специально для герметизации.

Перед испытанием изделий, длительное время находивших-

ся в контакте с атмосферным воздухом, необходимо принять меры к освобождению течей от влаги. Надежное вскрытие течей величиной меньше  $10^{-5}$  м<sup>3</sup> Па/с обеспечивает прогрев при температуре свыше 350°С. Поверхности изделий, не допускающих такого прогрева, рекомендуется ополаскивать летучей жидкостью с малых поверхностным натяжением, например ацетоном, а затем длительно прогревать до максимально возможных температур. Течи величиной больше  $10^{-5}$  м<sup>3</sup> Па/с освобождаются от воды под действием откачки или избыточного давления.

Если изделия должны подвергаться испытаниям на вибростенде или проходить испытания на прочность, могущие привести к образованию течей (сжатие, растяжение, тепловые удары, неравномерный нагрев, охлаждение и пр.), проверка на герметичность должна являться заключительным этапом испытаний.

Причиной повышенного давления в вакуумируемом объеме могут являться не только течи. Возможны газовыделения, а также, так называемые, внутренние течи, представляющие собой капиллярные каналы, соединяющие с откачиваемым объемом полость, изолированную в процессе сборки при атмосферном давлении в ней.

Весьма вероятно, например, образование внутренних течей в многослойных сварных швах. Внутренние течи могут брать начало из полостей за резьбовым креплением внутренних деталей; из канавок, освободившихся от припоя в процессе пайки; из полостей, образующихся между двумя спаями, герметизирующими одну и ту же деталь с двух сторон, например электрический ввод, со стороны атмосферы и со стороны вакуума. При неравномерном поджиге фланцев с канавочно-клиновым уплотнением возможно образование внутренней течи в результате хорошего уплотнения клина, по внешней кромке канавки, обращенной в атмосферу, и некачественного — со стороны вакуума. Ранее говорилось о возможности снижения надежности прошедших контроль изделий в результате нестабильного поведения течей. Но и открытые в момент испытаний течи могут быть не обнаружены, если не учтены конструктивные особенности изделий, доступность герметизирующих соединений для проникновения к ним пробных веществ. Так, например, течи могут быть не выявлены при испытаниях методом обдува, если обдуватель перемещается слишком быстро и на значительном расстоянии от поверхности объекта испытаний. В таких условиях пробный газ прежде рассеется, чем дойдет до течи. Не проникнет пробный газ во фланцевое уп-



лотнение через малый зазор между прилегающими друг к другу фланцами. Необходимо в одном из фланцев просверливать поперечное отверстие, имеющее выход в непосредственной близости от уплотняющего зуба. И вообще, следует помнить, что проверяемость изделий закладывается на этапах разработки конструкции и технологии.

В некоторых случаях герметизирующее соединение в узле становится недоступным для проверки в процессе последующей сборки. Здесь необходимы поузловые испытания, но с обязательной оценкой вероятности последующей разгерметизации.

## 2. МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ТЕЧЕИСКАНИЯ

### 2.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ТЕЧЕИСКАНИЯ

Методы течеискания существенно разнятся как по чувствительности и избирательности реакции на ПВ, так и по принципу его обнаружения. Чем выше избирательная способность метода течеискания, тем резче реакция на ПВ, тем больше чувствительность. Острота реакции зависит и от свойств ПВ. Она тем резче, чем сильнее выбранное вещество отличается от воздуха по электрическим, тепловым или другим свойствам, определяющим избирательную реакцию.

Наивысшей избирательностью обладают масс-спектрометрические (МС) течеискатели, способные выделять из парогазовой смеси, отбираемой от контролируемой оболочки, компонент определенной массы. В большинстве случаев МС – течеискатели настроены на регистрацию гелия, и присутствие посторонних паров и газов не сказывается на их показаниях. Высокие избирательность и чувствительность определяют широкие эксплуатационные возможности МС-течеискателей. С их помощью проводятся как вакуумные, так и атмосферные испытания, когда, соответственно, фиксируются натекания в вакуум или утечка в атмосферу из полости с избыточным давлением. МС-течеискатели применяются при разбраковке по степени герметичности замкнутых оболочек изделий.

Высокой разрешающей способностью обладает и радиоактивный метод обнаружения течей. Существуют течеискатели, реагирующие на появление целой группы веществ. Это галогенные (ГГ) и электронозахватные (ЭЗ) течеискатели.

ГГ – течеискатели снабжаются двумя преобразователями для вакуумных и атмосферных испытаний. При работе с ними

в качестве ПВ чаще всего используются хладоны 12 и 22, а иногда и жидкий хладон 113.

ЭЗ - течеискатели получили наименование из-за своей способности реагировать на электроотрицательные вещества, молекулы которых склонны присоединять к себе электроны и образовывать отрицательные ионы. Наиболее резко такая способность проявляется у элегаза (шестифтористой серы  $SF_6$ ) и, соответственно, с его применением обеспечивается наивысшая чувствительность к течам. Электроотрицательными свойствами, хотя и в несколько меньшей мере, обладают хладоны. К электроотрицательным веществам относится и кислород, так что ЭЗ-течеискатели способны фиксировать присутствие воздуха в электроположительном газе.

Для оценки степени герметичности по уровню достигаемого давления и по изменению давления в объемах могут применяться различные манометры и вакууметры. Вакууметры, реагирующие на изменение состава газов, могут применяться и при поиске течей с помощью ПВ. Избирательная способность вакууметров весьма мала. Тем не менее они широко применяются для течеискания как подручное средство, всегда имеющееся в вакуумной системе. Чувствительность индикации натеканий с помощью вакууметров тем выше, чем ниже измеряемое давление.

Вакуумные испытания обеспечивают искровые течеискатели, действие которых основано на возбуждении высокочастотного разряда при давлении от  $5 \cdot 10^{-1}$  до 500 Па в вакуумных системах, имеющих стеклянные участки оболочек. Характерное для кислорода красновато-фиолетовое свечение свидетельствует о натекании воздуха. Замещение воздуха ПВ вызывает изменение цвета разряда.

Для регистрации утечек ПВ в атмосферу используется катарометрический (КМ) течеискатель, в промышленном выпуске получивший название газоаналитического. Прибор этого типа способен реагировать на изменение теплопроводности газовой смеси, вводимой в преобразователь. Соответственно, чувствительность испытаний на герметичность с помощью КМ-течеискателя оказывается тем выше, чем больше выбранное ПВ отличается от воздуха по теплопроводности.

## 2.2. МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД И АППАРАТУРА ТЕЧЕИСКАНИЯ

Любой из МС-измерителей парциальных давлений, которыми комплектуются современные вакуумные системы, может

быть использован и как течеискательное устройство. Состав остаточных газов позволяет судить о проникновении в вакуум воздуха или хладагентов. Место течи можно обнаружить, если последовательно подавать ПВ на отдельные участки внешней поверхности оболочки и фиксировать соответствующие пики масс-спектра. Однако применимость такого способа течеискания ограничена в первую очередь невозможностью работы до достижения высокого вакуума. Сразу после сборки высоковакуумной системы, как правило, не удастся получить давлений, соответствующих рабочим для МС-газоанализаторов. А именно в этот момент важно оперативно найти и устранить течи или решить вопрос о необходимости обезгаживания.

Кроме того, пороговая чувствительность испытаний, проводимых с помощью измерителей парциальных давлений, определяемая равенством

$$Q_{\text{мин}} = \Delta p_{\text{мин}} S_{\text{э}}, \quad (13)$$

где  $Q_{\text{мин}}$  - минимальный регистрируемый поток ПВ, существенно ограничена значительной эффективной быстротой откачки  $S_{\text{э}}$  высоковакуумных объемов и относительно невысоким порогом чувствительности к изменениям парциальных давлений  $\Delta p_{\text{мин}}$ . Последнее обстоятельство связано с применением

узкощелевой ионной оптики, необходимой для получения требуемой высокой разрешающей способности. Поэтому всякая крупногабаритная вакуумная система, а также производственные участки ее изготовления и сборки оснащаются специальным течеискательным оборудованием, главным образом МС-течеискателями, обеспечивающими возможность испытаний различными способами и приемами.

Основным пробным газом (ПГ), применяемым при работе с МС-течеискателями, является гелий. Его малая молекулярная масса и низкая сорбционная способность обеспечивают хорошее проникновение через малые течи, а химическая инертность делает его безопасным в применении. Гелий в весьма малых количествах содержится в атмосферном воздухе и продуктах газовой выделения, так что фоновые эффекты при работе с ним сказываются значительно меньше, чем в случае применения других газов. Малая молекулярная масса гелия и относительно большое ее отличие от эффективной массы ионов, образующих соседние пики в масс-спектре (водород  $H_2^+$  и углерод  $C^{++}$ ), снижают требования к разрешающей способно-

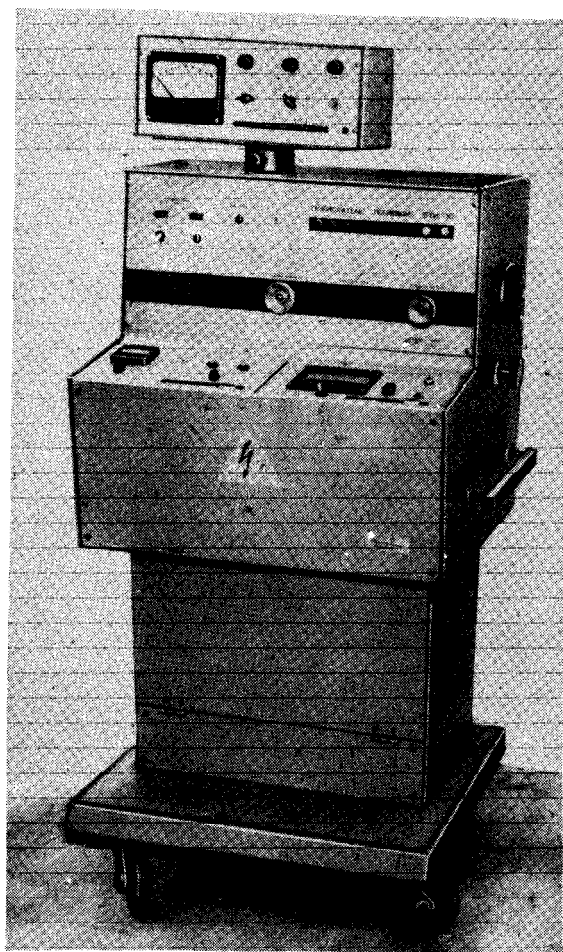


Рис. 1. Масс-спектрометрический течеискатель ПТИ-10

сти и обуславливают возможность применения в качестве чувствительных элементов течеискателей простых  $180^\circ$ -ных магнитных анализаторов с малым радиусом траектории ионов и широкими щелями. В настоящее время серийно выпускаются универсальный МС-течеискатель ПТИ-10 широкого назначения и сверхвысокочувствительный течеискатель СТИ-11, предназначенный для производственных испытаний приборов, к герметичности которых предъявляются особо высокие требования, и для обнаружения течей в широком диапазоне величин при отработке технологии герметизации. Общий вид течеискателей показан на рис. 1 и 2.

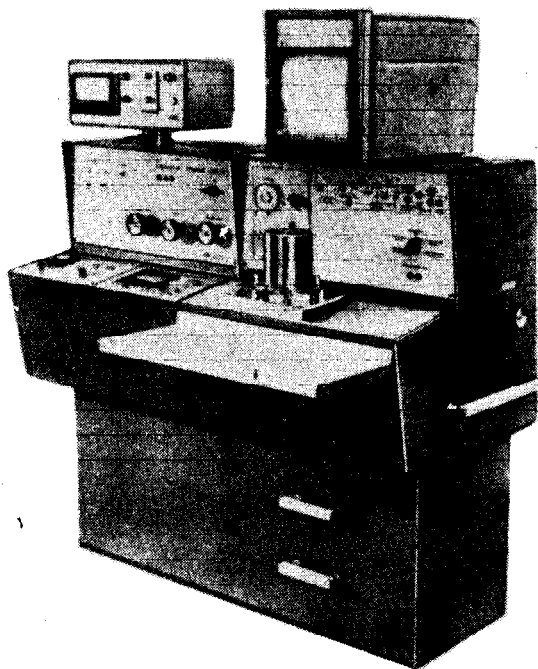


Рис. 2. Масс-спектрометрический течеискатель СТИ-11

Течеискатель СТИ-11 создан на базе и по максимальной унификации с ПТИ-10 путем введения некоторых дополнительных узлов. Поэтому рассматривать оба течеискателя целесообразно, пользуясь одной схемой вакуумной системы СТИ-11 (рис. 3). По ходу рассмотрения будут отмечены особенности, отличающие последние модели от более ранних. Это полезно, поскольку до сих пор еще находятся в промышленной эксплуатации течеискатели ПТИ-7А, ПТИ-7 и даже ПТИ-6.

Схемы вакуумных систем течеискателей ПТИ-10 и ПТИ-7А практически совпадают и характеризуются левым участком схемы рис. 3, очерченным пунктирной линией.

В отличие от ПТИ-7 и ПТИ-6, содержащих резиновые уплотнители, интенсивно сорбирующих и выделяющих гелий, ПТИ-10 собран целиком на металле, чем обеспечивается низкий уровень гелиевого фона.

Течеискатель ПТИ-10 выгодно отличается от ПТИ-7 усовершенствованным масс-спектрометрическим анализатором. Существенно уменьшены габариты и масса магнита (6 кг вместо 28 кг у ПТИ-7). Улучшены эксплуатационные харак-

20

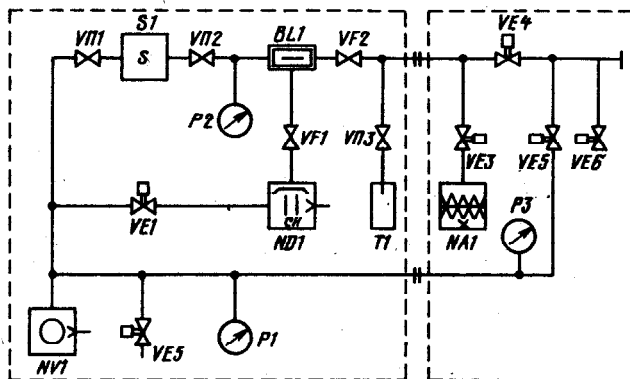


Рис. 3. Схема вакуумной системы течеискателя СТИ-11

$S1$  - масс-спектрометрический анализатор;  $NV1$  - механический вакуумный насос;  $ND1$  - паромасляный насос;  $NA1$  - адсорбционный цеолитовый насос;  $BL1$  - охлаждаемая (азотная) ловушка;  $P1-P3$  - вакуумметрические преобразователи;  $VE1-VE6$  - клапаны с электромагнитным приводом;  $VP1-VP3$  - клапаны с ручным приводом;  $VF1-VF2$  - дросселирующие клапаны;  $T1$  - калиброванная гелиевая течь

теристики анализатора - все элементы ионной оптики расположены на съемной крышке, что существенно упрощает их разборку, чистку и юстировку.

Чувствительность анализатора ПТИ-10 около  $7,5 \cdot 10^{-6}$  А/Па, что соответствует возможности регистрации парциального давления гелия  $p_{\text{мин}} \approx 1,33 \cdot 10^{-10}$  Па.

Определяемая (13) пороговая чувствительность течеискателя к потоку при заданном  $p_{\text{мин}}$  увеличивается с уменьшением быстроты откачки анализатора  $S$ . Регулировку  $S$  обеспечивает дросселирующий клапан на входе пароструйного насоса. Дросселировать откачку можно вплоть до достижения в анализаторе максимально допустимого рабочего давления. Реально при дросселировании обеспечивается возможность индикации потоков вплоть до  $10^{-13}$  мПа/с. Повышая чувствительность дросселированием, следует, однако, иметь в виду происходящее при этом ухудшение временных характеристик, приводящее к необходимости увеличивать время подачи пробного газа на испытуемое изделие. Ускорить откачку газа, проникшего через течь, можно открывая дросселирующий клапан.

В течеискателе СТИ-11 (см. рис. 3) к основной вакуумной схеме течеискателя ПТИ-10 добавлен сорбционный цеолитовый насос, обеспечивающий возможность достижения предельно высокой чувствительности в режиме избирательного накопления гелия. Пароструйный насос при этом изолирован от системы накопления (испытываемое изделие — анализатор — цеолитовый насос) перекрытым дросселирующим клапаном. Охлаждаемый цеолитовый насос, заполненный цеолитом СаА, интенсивно откачивает все газы, кроме гелия, поддерживая неизменным общее давление в анализаторе. Быстрота откачки по гелию при этом не превышает  $10^{-7}$  м<sup>3</sup>/с, так что даже самые малые ( $10^{-13}$ – $10^{-14}$  м<sup>3</sup> Па/с) фоновые потоки гелия вызывают заметный линейно нарастающий фоновый сигнал. При записи сигнала течеискателя на самопишущем потенциометре, входящем в комплект прибора, по увеличению скорости изменения сигнала после подачи гелия на негерметичную оболочку можно судить о наличии и величине течи. Для того, чтобы обеспечить возможность регистрации малых течей по обычному стрелочному выходному прибору в течеискателе СТИ-11 предусмотрена система динамической компенсации — в обратную связь усилителя постоянного тока подается напряжение обратной полярности, нарастающее с той же скоростью, что и напряжение, обусловленное фоновым сигналом. В результате до поступления потока гелия через течь показания выходного прибора поддерживаются на нулевом уровне.

В СТИ-11, рассчитанном, в основном, на испытания малогабаритных изделий, предусмотрена их предварительная откачка от атмосферы механическим насосом течеискателя. Такая операция при работе с ПТИ невозможна, для нее приходится применять вспомогательные насосы.

В отличие от ПТИ-7А и предшествующих моделей в линиях предварительного разрежения течеискателей ПТИ-10 и СТИ-11 установлены электромагнитные клапаны, обеспечивающие защитную блокировку их вакуумной системы при аварийном отключении сетевого напряжения, и автоматический напуск атмосферного воздуха в механический насос при его выключении.

В СТИ-11 введены дополнительные электромагнитные клапаны: входной, установленный последовательно с входным дросселирующим для оперативного присоединения к течеискателю изделий (после их форвакуумной откачки) и блокировки течеискателя на случай прорыва атмосферы в изделие;

на входе цеолитового насоса — для изоляции его на время предварительных испытаний, проводимых с подключенным пароструйным насосом.

Управление всеми электромагнитными клапанами в СТИ-11 запрограммировано, и тем самым, определена последовательность всех операций откачки и контроля.

В комплектацию масс-спектрометрических течеискателей входят шупы. Система шупа течеискателя СТИ-11 выгодно отличается наличием в ней цеолитовой колонки. Применяемая вместо вспомогательного механического насоса цеолитовая колонка поглощает все газы, кроме гелия, полностью пропускаемого в анализатор течеискателя. Тем самым обеспечивается возможность полного вскрытия входного клапана течеискателя и достижения максимальной чувствительности шуповых испытаний, вплоть до  $7 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$  (при обычных шуповых испытаниях чувствительность не превышает  $7 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ ). Цеолитовая колонка шупа охлаждается погружением в стакан основного цеолитового насоса течеискателя и регенерируется простым отопгреванием до комнатной температуры.

Контроль чувствительности МС-гелиевых течеискателей осуществляется с помощью калиброванных диффузионных течей типа ГЕЛИТ. Действие их основано на диффузии гелия сквозь мембрану из плавленного кварца (ГЕЛИТ-1) или из молибденового стекла (ГЕЛИТ-2). Проницаемость кварцевого стекла для гелия больше и, соответственно, течи ГЕЛИТ-1 создают большие потоки ( $5 \cdot 10^{-8} - 10^{-9} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ ), по сравнению с ГЕЛИТ-2 ( $\approx 10^{-10} - 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ ).

Калиброванная течь ГЕЛИТ выполнена в виде металлического баллона с патрубком для присоединения ее к течеискателю или испытываемой системе.

#### Основные характеристики калиброванных течей ГЕЛИТ:

|                                                                       |          |
|-----------------------------------------------------------------------|----------|
| изменение потока с температурой,<br>% на $^{\circ}\text{C}$ . . . . . | 3        |
| габаритные размеры (длина х диаметр), мм . . . . .                    | 210 х 42 |
| диаметр присоединительного патрубка, мм . . . . .                     | 10       |
| давление гелия в баллоне, кПа . . . . .                               | 5-100    |



Основные характеристики  
масс-спектрометрических течеискателей:

|                                                                             | <u>ПТИ-10</u>           | <u>СТИ-11</u>      |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------|
| минимальная регистрируемая величина потока гелия, м <sup>3</sup> Па/с . . . | $1 \cdot 10^{-12}$      | $5 \cdot 10^{-14}$ |
| Электропитание . . . . .                                                    | трехфазная сеть 220/380 |                    |
| Потребляемая мощность, Вт . .                                               | 900                     | 1100               |
| Габариты, мм                                                                | 540x600x1400            | 1245x780x1325      |
| Масса, кг . .                                                               | 180                     | 220                |

### 2.3. СХЕМЫ И СПОСОБЫ ИСПЫТАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕЧЕИСКАТЕЛЕЙ

МС-течеискатели получили весьма широкое распространение во всех областях науки и техники, связанных с созданием, производством и эксплуатацией герметизированных систем, оборудования и приборов. Наиболее широко применяются универсальные течеискатели ПТИ-10 (а также и ранее выпускавшиеся аналогичные приборы), обладающие сравнительно простым устройством и небольшой стоимостью и позволяющие решать самые разнообразные задачи течеискания при испытаниях объектов с объемом внутренней полости от нескольких кубических миллиметров до десятков и сотен кубических метров. Эффективность применения этих течеискателей - возможность обнаружения весьма малых течей, оперативность проверки герметичности и надежность ее результатов - достигаются не только вследствие их высоких собственных технических показателей, но также и благодаря использованию специальных схем испытаний, некоторые из которых рассматриваются ниже.

На рис. 4,а сплошными линиями представлена схема вакуумной системы, часто применяемая при проверке герметичности изделий, их узлов и деталей, элементов вакуумных систем. Газ из изделия С1 откачивается механическим насосом

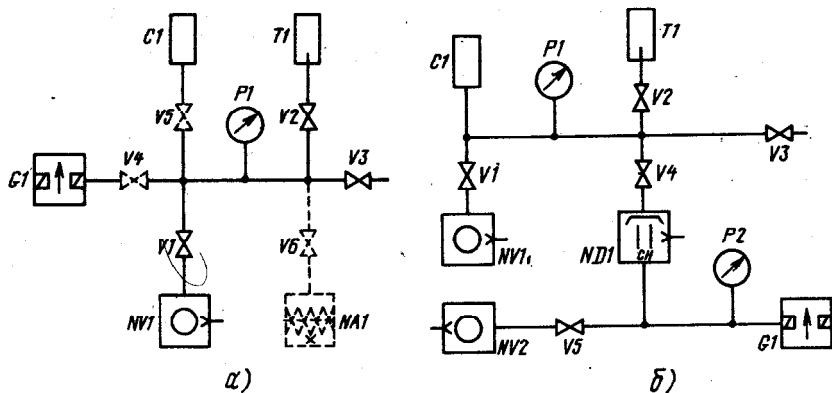


Рис. 4. Схемы вакуумных систем, применяемых при масс-спектрометрических испытаниях на герметичность объектов малого (а) и большого (б) объема.

Пунктиром рис. 4,а показаны дополнительные элементы, включаемые в схему для испытаний с накоплением гелия. C1 - испытуемый объект; G1 - течеискатель, NV1, NV2 - механические вакуумные насосы; ND1 - пароструйный насос; NA1 - адсорбционный цеолитовый насос, T1 - калиброванная гелиевая течь, P1, P2 - вакуумметрические преобразователи; V1-V6 - вакуумные клапаны

NV1. Затем полость изделия сообщается с течеискателем G1 через имеющийся в нем входной дросселирующий клапан\*. При отсутствии грубых течей в изделии и небольшом газовыделении дросселирующий клапан течеискателя открывается полностью, а клапан V1 закрывается с тем, чтобы весь газ, поступающий из изделия, проходил через течеискатель, и обеспечивалась максимальная чувствительность обнаружения течей. Когда общее давление в вакуумной системе течеискателя и его фоновый сигнал стабилизируются, к внешней поверхности изделия подается гелий. При проверке общей герметичности для этой цели используется специальный колпак (камера) или чехол, под который подается гелий; при поиске мест течей изделие обдувается гелием. Величину регистри-

\* Для герметичного присоединения проверяемых изделий применяются самые разнообразные уплотнительные устройства - фланцевые и грибковые с эластомерными и металлическими прокладками, различные виды присосок, резиновые вакуумные шланги и т.п.

руемого потока гелия  $Q$  находят, сравнивая полезный сигнал, наблюдавшийся при проверке изделия, с сигналом, вызываемым калиброванной гелиевой течью Т1.

Реакция течеискателя на обнаруживаемую течь определяется изменением парциального давления гелия в анализаторе  $\Delta p$ . В общем случае  $\Delta p$  зависит от параметров самого течеискателя, вспомогательной системы, проверяемого объекта и условий проверки. В рассматриваемой схеме испытаний при отключенном вспомогательном насосе NV1

$$\Delta p = \frac{Q}{S_{\text{э}}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (14)$$

где  $S_{\text{э}}$  - эффективная быстрота откачки гелия из масс-спектрометрического анализатора;  $t$  - время поступления гелия через течь;  $\tau$  - постоянная времени, характеризующая инерционность изменения сигнала. При проверке изделий с небольшим объемом внутренней полости  $V$ , меньшим объема высоковакуумной части течеискателя ( $V_T \approx 1$  л) или примерно равным этому объему, можно принять

$$\tau \approx \frac{V_T + V_c + V}{S_{\text{э}}}, \quad (15)$$

где  $V_c$  - объем коммуникаций вспомогательной системы.

Из (14) видно, что при достаточно длительной подаче гелия на течь, когда  $t \gg \tau$ ,  $\Delta p \approx \frac{Q}{S_{\text{э}}}$  полезный сигнал может быть увеличен путем уменьшения эффективной быстроты откачки гелия  $S_{\text{э}}$ . Такая возможность предусмотрена конструкцией течеискателей, имеющих специальный дросселирующий клапан. Однако возможности дросселирования ограничиваются увеличением общего давления в анализаторе (уменьшается быстрота откачки всех газов, а не только гелия) и возрастанием фонового сигнала. По этим причинам дросселирование откачки оказывается целесообразным только в случае объектов с малым газовыделением и низким фоновым потоком гелия. Но даже в таких случаях удастся повысить чувствительность испытаний не более, чем в 5-10 раз (при этом регистрируются потоки гелия  $\approx 10^{-12}$  м<sup>3</sup> Па/с).

При малой длительности поступления гелия через течь, например при поиске мест течей, дросселирование откачки нецелесообразно, так как увеличение постоянной времени  $\tau$

приводит к тому, что полезный сигнал становится независимым от  $S_{\ominus}$  - формула (14) принимает вид

$$\Delta p \approx \frac{Q t}{V_T + V_c + V} \quad (16)$$

Важным параметром схемы испытаний является проводимость (по гелию)  $U$  коммуникации, связывающей проверяемое изделие с течеискателем. Желательно, чтобы при полностью открытом входном клапане течеискателя величина  $U$  удовлетворяла условию:

$$U \gg S_{\ominus} \frac{V}{V_T} = \frac{V}{\tau_T}^* \quad (17)$$

Нарушение этого условия приводит к дополнительному увеличению инерционности изменения сигнала течеискателя.

На практике условие (17) обычно не выполняется даже при относительно небольшом объеме изделий ( $V \approx V_T$ ). При этом постоянная времени  $\tau$  увеличивается. В рассматриваемых условиях испытаний она определяется выражением

$$\tau \approx \frac{U + S_{\ominus}}{U S_{\ominus}} \quad (18)$$

Для проверки общей герметичности небольших изделий с повышенной чувствительностью вспомогательную систему дополняют адсорбционным цеолитовым насосом N A1 с клапаном V6 и быстродействующими клапанами V4 и V5 (эти элементы показаны на рис. 4,а пунктиром). Цеолитовый насос позволяет поддерживать во вспомогательной системе и течеискателе достаточно низкое давление остаточных газов при дросселировании откачки, что способствует более стабильной работе масс-спектрометрического анализатора. Кроме того, он дает возможность проводить испытания в режиме накопления гелия. Накопление производится в объеме изделия, изолированном клапаном V5. Остальная часть вспомогательной системы во время накопления вакуумируется насосами течеискателя через клапан V4. Перед окончанием заданного

---

\*  $\frac{V_T}{S_{\ominus}}$  - постоянная времени течеискателя ( $\tau_T$ ) составля-

ет не более 0,5 с.

руемого потока гелия  $Q$  находят, сравнивая полезный сигнал, наблюдавшийся при проверке изделия, с сигналом, вызываемым калиброванной гелиевой течью  $T1$ .

Реакция течеискателя на обнаруживаемую течь определяется изменением парциального давления гелия в анализаторе  $\Delta p$ . В общем случае  $\Delta p$  зависит от параметров самого течеискателя, вспомогательной системы, проверяемого объекта и условий проверки. В рассматриваемой схеме испытаний при отключенном вспомогательном насосе  $NV1$

$$\Delta p = \frac{Q}{S_{\text{э}}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (14)$$

где  $S_{\text{э}}$  - эффективная быстрота откачки гелия из масс-спектрометрического анализатора;  $t$  - время поступления гелия через течь;  $\tau$  - постоянная времени, характеризующая инерционность изменения сигнала. При проверке изделий с небольшим объемом внутренней полости  $V$ , меньшим объема высоковакуумной части течеискателя ( $V_T \approx 1$  л) или примерно равным этому объему, можно принять

$$\tau \approx \frac{V_T + V_c + V}{S_{\text{э}}}, \quad (15)$$

где  $V_c$  - объем коммуникаций вспомогательной системы.

Из (14) видно, что при достаточно длительной подаче гелия на течь, когда  $t \gg \tau$ ,  $\Delta p \approx \frac{Q}{S_{\text{э}}}$  полезный сигнал может быть увеличен путем уменьшения эффективной быстроты откачки гелия  $S_{\text{э}}$ . Такая возможность предусмотрена конструкцией течеискателей, имеющих специальный дросселирующий клапан. Однако возможности дросселирования ограничиваются увеличением общего давления в анализаторе (уменьшается быстрота откачки всех газов, а не только гелия) и возрастанием фоновых сигналов. По этим причинам дросселирование откачки оказывается целесообразным только в случае объектов с малым газовыделением и низким фоновым потоком гелия. Но даже в таких случаях удается повысить чувствительность испытаний не более, чем в 5-10 раз (при этом регистрируются потоки гелия  $\approx 10^{-12}$  м<sup>3</sup> Па/с).

При малой длительности поступления гелия через течь, например при поиске мест течей, дросселирование откачки нецелесообразно, так как увеличение постоянной времени  $\tau$

Увеличение инерционности изменения сигнала течеискателя в рассмотренной схеме испытаний и резкое возрастание затрат времени на предварительную откачку проверяемых объектов с увеличением их объема ограничивают области целесообразного применения схемы (см. рис. 4,а) объектами не-большого объема (не более нескольких литров).

На рис. 4,б приведена типовая схема вакуумной системы, используемой при проверке герметичности объектов большого объема ( $V \gg V_T$ ). Для быстрой подготовки объекта к испытаниям в ней предусмотрены две линии: предварительной откачки механическим насосом  $NV1$  и высоковакуумной - пароструйным насосом  $ND1$ . Течеискатель  $G$  подключается к линии предварительного разрежения высоковакуумного насоса  $ND1$ , соединенной с механическим насосом  $NV2$ . Такое присоединение позволяет при малом общем газовыделении и натекании полностью отключить насос предварительного разрежения клапаном  $V5$  и направить в течеискатель весь газ, откачиваемый из проверяемого объема.

В случае большой газовой нагрузки испытания ведутся при работающем механическом насосе  $NV2$ , как это оговаривалось ранее для схемы рис. 4,а.

Преимущество схемы 4,б перед схемой 4,а заключается в возможности многократного уменьшения инерционности изменения полезного сигнала при проверке объектов большого объема  $V$  за счет значительной быстроты откачки  $S'_1$ , обеспечиваемой пароструйным насосом (постоянная времени

$\tau' = \frac{V}{S'_1}$ ). Это находит отражение в уравнении

$$\Delta p = \frac{Q}{S_\partial} \frac{\tau'(1 - e^{-\frac{t}{\tau'}}) - \tau(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})}{\tau' - \tau}, \quad (19)$$

относящемся к случаю прокачки всего газа, поступающего из проверяемого объекта через течеискатель. Здесь  $\tau = \frac{V_T + V_c}{S_\partial}$ ,

в отличие от определяемого уравнением (15), не зависит от объема испытываемого объекта.

Существенно, что требования, предъявляемые к насосу предварительного разрежения в схеме рис. 4,б не зависят от объема проверяемого объекта (постоянная времени откачки

гелия этим насосом  $\tau'' = \frac{V_c}{S''_{\text{э}}}$ ) и определяются, главным

образом, общей газовой нагрузкой.

В конечном счете и пределы обнаружения течей, реально достигаемые при испытаниях объектов большого объема в различных условиях, определяются общим газовыделением проверяемого объекта и фоновым потоком гелия, выделяемого всеми элементами испытательной системы, главным образом, такими, как эластомерные уплотнители и рабочие жидкости насосов.

Для достижения высокой чувствительности обнаружения течей обычно требуется тщательная подготовка объектов к испытаниям, выявление и устранение течей в самой испытательной установке, длительная откачка, а иногда и термическое обезгаживание объекта и отдельных частей установки.

Трудности могут возникнуть и при поиске очень больших течей, не позволяющих получить сколько-нибудь значительное разрежение в проверяемом объеме, — большие размеры объекта и медленное распространение в нем гелия крайне усложняют выявление дефекта. Кроме того, в толстых стенках объектов большого объема могут встречаться течи с большой собственной постоянной времени, обусловленной наличием промежуточной полости, сообщающейся узкими каналами с наружной и внутренней поверхностями. Такие течи трудно найти способом обдува. В подобных случаях более эффективными могут оказаться испытания с введением гелия внутрь проверяемых объектов и регистрацией его утечки наружу. Основанные на этом принципе способы высокочувствительных испытаний для многих объектов являются и единственно возможными (достаточно вспомнить объекты, конструкция которых не допускает воздействия внешнего избыточного давления, или длинные трубопроводы, не обеспечиваемые необходимой эффективной быстротой откачки). Предпочтительность этих способов может быть обусловлена и соображениями экономического характера, такими, как возможность экономии гелия или применения менее дорогостоящего оборудования и т.п. Рассмотрим некоторые из таких способов.

Способ вакуумной камеры, в которой размещается содержащее пробный газ изделие (барокамерный способ), применяется при проверке общей герметичности широкого круга объектов — от миниатюрных изделий приборостроения до космических устройств и аппаратов. Барокамера, присоединенная к

испытательной установке, выполненной в соответствии с одной из рассмотренных выше схем рис. 4, герметично закрывается и вакуумируется, а затем сообщается с течеискателем. Одновременно с камерой газ откачивается и из внутренней полости изделия, если процесс испытаний предусматривает откачку\*. После стабилизации общего остаточного давления в системе и фонового сигнала течеискателя в изделие вводится гелий, утечка которого в камеру обнаруживается по увеличению сигнала течеискателя.

Разновидностью барокамерного способа является способ местных вакуумных камер, применяемый для выявления негерметичных элементов или отдельных участков стенки. Такие камеры охватывают только часть поверхности объекта и уплотняются на ней с помощью эластичных (обычно резиновых) уплотнителей с использованием атмосферного давления (камеры-присоски) или специальных приспособлений. Обычно небольшой объем полости камеры (сравнимый с объемом выскоковакуумной части течеискателя) позволяет проводить испытания крупногабаритных объектов по схеме рис. 4, а с использованием вспомогательного насоса небольшой производительности.

Пределы обнаружения течей при испытаниях барокамерным способом лимитируются в основном теми же факторами, что и при испытаниях с регистрацией натеканий гелия внутрь изделий. Отличие состоит в том, что инерционность изменения сигнала течеискателя зависит здесь не от объема полости изделия, а от величины свободного объема вакуумной камеры, который можно ограничить при ее проектировании. Доступность внутренней поверхности камеры и наружной поверхности изделия для подготовительных процедур позволяет принять меры к уменьшению общего газовыделения камеры и изделия и создаваемого ими фонового потока гелия.

Способ вакуумной камеры применим и для проверки герметичности замкнутых оболочек изделий в случае, если в их полости предварительно вводится гелий. Поток гелия, создаваемый камерой с контролируемым изделием сравнивается со

\*Вакуумирование полости изделия в последующем облегчает доступ гелия к течам, расположенным в плохо продуваемых элементах конструкции – различного рода полостях, отростках и т.п. В некоторых случаях одновременная откачка газа из изделия производится с целью избежания деформации последнего. В таких случаях гелий вводится в изделие при пониженном давлении.



средней величиной фонового потока от пустой камеры или камеры, содержащей заведомо герметичное изделие. Этот способ, позволяющий при проверке небольших изделий надежно обнаруживать утечки гелия  $\approx 10^{-9} \div 10^{-10} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ , получил широкое распространение в приборостроении. Местонахождение течей в наполненных гелием негерметичных объектах устанавливается способом шупа. Шуп, прилагаемый к масс-спектрометрическому течеискателю, представляет собой регулируемый игольчатый клапан-натекатель, который с помощью гибкого вакуумного шланга соединяется со входом течеискателя и вспомогательным насосом. Оператор перемещает шуп над поверхностью проверяемого объекта и следит за сигналом течеискателя, зависящим от содержания гелия в поступающем в него воздухе. Повышенная концентрация гелия у выхода течи позволяет установить ее местоположение.

Вспомогательный насос обеспечивает возможность прокачки через шуп потока, в 50-100 раз превышающего максимальный рабочий поток течеискателя. Это увеличивает его "дальность действия" (газ захватывается с большего расстояния от входного отверстия шупа) и уменьшает время реакции течеискателя на изменение концентрации гелия в отбираемом газе. Кроме того, в этом случае появляется возможность применения значительно более простых и удобных капиллярных шупов\* и различных насадок, увеличивающих ширину контролируемой зоны поверхности объекта.

Применение вместо механического вспомогательного насоса адсорбционной колонки, установленной на входе течеискателя, позволяет уменьшить флуктуации полезного сигнала при одновременном его увеличении. В простейшем случае такая колонка представляет собой наполненную адсорбентом (цеолитом, активированным углем) U-образную трубку, охлаждаемую жидким азотом. В колонке поглощается большинство газов, отбираемых шупом, а весь гелий поступает в течеискатель.

---

\*Капиллярный шуп представляет собой тонкую гибкую трубку из неокисляющегося материала - нержавеющей стали, пластмассы и т.п. При длине 2-5 м оптимальная проводимость капиллярного шупа достигается при диаметре отверстия 0,1-0,2 мм. Такой шуп, не требующий регулировки, легко изготовить своими силами, например вытягиванием пластмассовой оболочки, снятой с тонкого провода.

Для уменьшения фонового сигнала течеискателя, вызываемого гелием, содержащимся в окружающем воздухе, предложены различные конструкции шупов с так называемой "газовой завесой". Такой шуп отличается от обычного тем, что имеет два концентрических канала, из которых внутренний используется для отбора газа в течеискатель, а по наружному в контролируемую зону подается газ, не содержащий гелия. Перечисленные усовершенствования значительно облегчают испытания, производимые способом шупа, и позволяют обнаруживать местонахождение течей, величиной менее  $10^{-9}$  м Па/с.

Для проверки чувствительности, достигаемой при испытаниях способом шупа, и оценки величин обнаруживаемых течей используются калиброванные течи, имитирующие точечный источник гелия. В качестве такого источника может служить обычная калиброванная диффузионная гелиевая течь типа ГЕЛИТ, на присоединительном патрубке которой устанавливается специальная насадка с малым отверстием (0,2–0,5 мм). Установившийся поток гелия, вытекающего через отверстие насадки, равен его потоку, проходящему через диффузионную мембрану. Величина потока, указываемая в паспорте течи, может составлять от  $10^{-11}$  до  $10^{-8}$  м<sup>3</sup> Па/с.

Время, затрачиваемое на поиск течей способом шупа, сокращается, если в результате предварительных испытаний выявлен негерметичный участок оболочки проверяемого объекта. Для этой цели нередко применяется способ чехла. Подозреваемая в негерметичности часть оболочки наполненного гелием объекта накрывается пленкой из эластичной пластмассы. Края пленки клейкой лентой или иным способом по возможности плотно приклеиваются к стенкам объекта. После определенного времени выдержки воздух, находящийся под чехлом над различными участками поверхности объекта, с помощью шупа отбирается в течеискатель, который позволяет обнаружить повышение концентрации гелия над негерметичными участками. Для повышения чувствительности обнаружения течей пространство между чехлом и стенкой объекта перед началом испытаний иногда продувают газом, не содержащим гелия.

## 2.4. ГАЛОГЕННЫЕ ТЕЧЕИСКАТЕЛИ

Действие галогенных течеискателей основано на свойстве платины, накаливаемой до 800–900°С, увеличивать эмиссию

положительных ионов в присутствии галогенов. Эффект наблюдается как при атмосферном давлении, так и в вакууме. Поэтому последняя модель малогабаритного переносного галогенного (галоидного) течеискателя ГТИ-6 (рис. 5), представляющая собой измерительный блок с двумя преобразователями – вакуумным и атмосферным, применяется как при испытании вакуумных систем, так и объектов, наполненных галогеносодержащими веществами, вытекающими через течи в атмосферу. Чувствительный элемент обоих преобразователей представляет собой платиновый диод с навитым на керамическую трубку анодом прямого накала. Испаряемые из керамики щелочные металлы ионизируются на накаливаемой поверхности платины. Эмитируемые анодом ионы поступают на второй электрод – платиновый коллектор, соединенный с усилителем постоянного тока. Стрелочный прибор на выходе усилителя регистрирует увеличение ионного тока при обнаружении течи, через которую проникает галогеносодержащее вещество. Сигнал дублируется звуковым индикатором. В качестве ПВ при работе с ГТИ-6 чаще всего применяются газообразные хладоны 12 и 22 или жидкий хладон 113.

Вакуумный преобразователь смонтирован на фланце и поддерживает чувствительный элемент и кислородный инжектор, разогреваемый собственным теплом работающего преобразователя. Инжектор выделяет кислород в результате термического разложения марганцево-кислого калия  $KMnO_4$ . Применение кислородного инжектора способствует сохранению высокой чувствительности преобразователя, работающего в условиях высокого вакуума. При давлениях выше  $10^{-1}$  Па применение кислородного инжектора не обязательно. Установка преобразователя на высоковакуумной стороне испытываемой системы

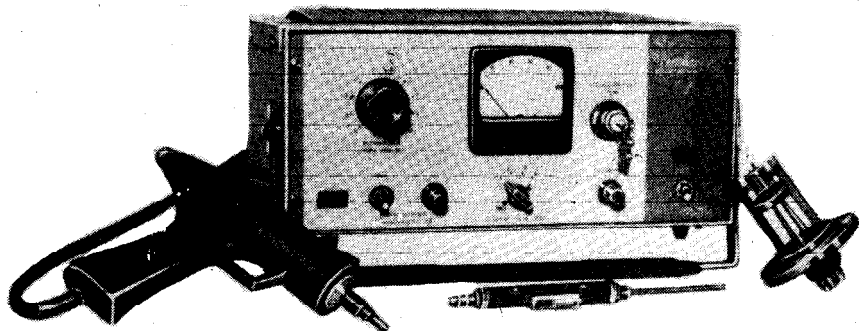


Рис. 5. Галогенный течеискатель ГТИ-6

предпочтительна, поскольку обеспечивает повышенную стабильность работы и более высокую чувствительность вакуумных испытаний. Достижимая пороговая чувствительность оценивается потоком  $10^{-9}$  м<sup>3</sup> Па/с при эффективной скорости откачки преобразователя  $10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с. Это соответствует пороговой чувствительности к парциальному давлению хладагента 12 порядка  $10^{-6}$  Па.

Атмосферный преобразователь – шуп выполнен в виде пистолета. В передней его части расположен чувствительный элемент, идентичный (предусмотрена взаимозаменяемость) применяемому в вакуумном преобразователе. За чувствительным элементом расположено вентиляционное устройство, просасывающее через него воздух, отбираемый от испытуемой поверхности. В задней части преобразователя расположен световой индикатор течи. Течеискатель снабжен калиброванной течью для оценки его чувствительности при работе с атмосферным преобразователем.

Чувствительность течеискателя регулируется изменением тока накала преобразователя. Предусмотрена возможность компенсации начального (фоновое) тока преобразователей. Действие входящей в комплект течеискателя калиброванной течи ГАЛОТ-1 основано на равновесном истечении сублимирующегося пара твердого вещества – гексахлорэтана через малое, постоянно открытое отверстие. По своему воздействию на течеискатель течь имитирует поток хладагента 12 от  $9 \cdot 10^{-7}$  до  $1,3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup> Па/с. Изменение величины течи с температурой составляет  $\pm 8,8 \cdot 10^{-9}$  Δ Т м<sup>3</sup> Па/с.

Кроме ГТИ-6 промышленностью выпускается галогенный течеискатель БГТИ-7 с автономным питанием, предназначенный для полевых испытаний зарытых в землю трубопроводов и кабелей. Для обеспечения возможности отбора проб из шурфов к шупу течеискателя прилагается насадка-удлинитель.

#### Основные характеристики галогенных течеискателей:

|                                                                                         | <u>ГТИ-6</u>      | <u>БГТИ-7</u>     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Минимальная величина регистрируемой утечки хладагента 12, м <sup>3</sup> Па/с . . . . . | $1 \cdot 10^{-7}$ | $8 \cdot 10^{-7}$ |
| Минимальная величина регистрируемого парци-                                             |                   |                   |

|                                                                              | <u>ГТИ-6</u>              | <u>БГТИ-7</u>            |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| ального давления хладона<br>12 в вакуумных систе-<br>мах, Па . . . . .       | $1 \cdot 10^{-6}$         | -                        |
| Диапазон рабочих давле-<br>ний вакуумного преобра-<br>зователя, Па . . . . . | $10^{-4}$ - $10^{-2}$     | -                        |
| Напряжение питания, В .                                                      | 220                       | 12                       |
| Потребляемая мощ-<br>ность, Вт . . . . .                                     | 75                        | 35                       |
| Габаритные размеры<br>регистрирующего блока, мм                              | 360 x<br>x 160 x<br>x 200 | 89 x<br>x 304 x<br>x 330 |
| Масса, кг:                                                                   |                           |                          |
| регистрирующего<br>блока . . . . .                                           | 10                        | 2,5                      |
| атмосферного преоб-<br>разователя с кабелем .                                | 1,3                       | 0,7                      |
| вакуумного преобра-<br>зователя . . . . .                                    | 1,2                       | -                        |

## 2.5. ИСКРОВОЙ ТЕЧЕИСКАТЕЛЬ ИО43.009

Искровой помехозащищенный течеискатель ИО43.009 (рис. 6) представляет собой простейший переносной прибор, предназначенный для оценки степени разрежения и отыскания мест течей в стеклянных вакуумных системах, а также в металлических откачиваемых системах при наличии в них стеклянных деталей. Течеискатель состоит из блока питания и зонда со стержневым электродом.

Действие течеискателя основано на возбуждении безэлектродного ВЧ-разряда в объеме при давлении  $5 \cdot 10^{-1}$ -50 Па. Цвет разряда зависит от степени достигнутого разрежения и рода газов, содержащихся в объеме или проникающих в него через течь. Место течи в стеклянной оболочке можно обнаружить при перемещении вдоль нее зонда. Приближение к течи сопровождается формированием рассеянного пучка искр в тонкий ярко-белый пучок, направленный с острия электрода точно на место течи. Течи в шлифовых и других соединениях так же, как и в металлических частях системы, могут быть обнаружены по изменению цвета разряда при проникновении

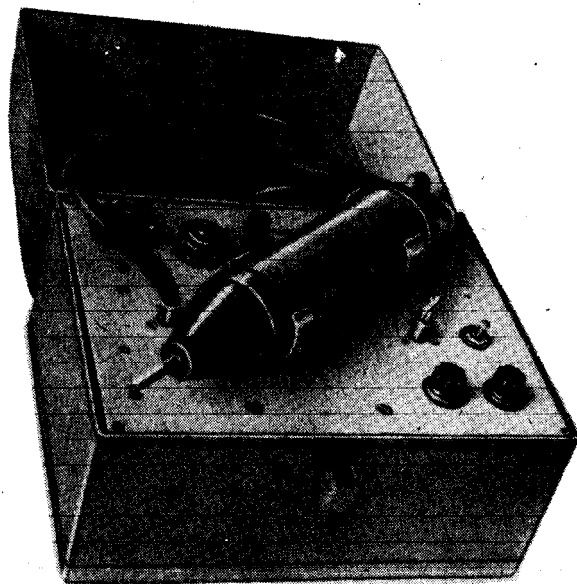


Рис. 6. Искровой течеискатель ИО43.009

сквозь течь ПВ (ацетона, спирта, углекислого газа и т.п.). Разряд возбуждается прикосновением электрода к стеклу или, лучше, к металлическому вводу, впаянному в стекло. Участки поверхности, подозреваемые в натекании, смачиваются или обдуваются ПВ. В случае его проникновения через течь лилово-красное свечение, характерное для воздуха, меняется на голубовато-серое.

Основные характеристики течеискателя ИО43.009:

|                                                     |        |
|-----------------------------------------------------|--------|
| Максимальная длина искры, мм . . . . .              | 20     |
| Видимое свечение в диапазоне давлений, Па . . . . . | 0,5-50 |
| Потребляемая мощность, Вт . . . . .                 | 60     |
| Габаритные размеры, мм:                             |        |
| блока питания . . . . .                             | 250 x  |
|                                                     | x210 x |
|                                                     | x200   |
| высокочастотного трансформатора                     |        |
| (длина x диаметр) . . . . .                         | 217 x  |
|                                                     | x37    |
| Общая масса, кг . . . . .                           | 5      |

## 2.6. ТЕЧЕИСКАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ВАКУУММЕТРОВ

До последнего времени метод регистрации течей с помощью всех измерителей давления, пониженного и повышенного, носил название манометрического. В настоящее время наметилась тенденция выделять вакуумметрический метод, поскольку вакуумметры, в отличие от манометров, позволяют регистрировать течи не только по изменению полного давления, но и по изменению состава газовой среды, вызванного натеканием ПВ.

Из числа наиболее распространенных к вакуумметрам, реагирующим на состав газовых сред, относятся ионизационные, магнитные – электроразрядные и тепловые вакуумметры. Характеристиками неабсолютных преобразователей давления обладают также ионно-геттерные и магнитные электроразрядные насосы. По крайней мере один из этих вакуумметров или насосов является обязательным элементом современных вакуумных систем. Это делает вакуумметрический метод течеискания особенно простым и удобным.

Простейший случай вакуумметрических испытаний – обнаружение натеканий и оценка их величин по характеру изменения давления в объеме, изолированном от откачки. Скорость нарастания давления  $\Delta P / \Delta t$  в момент изоляции объема  $V$  (пунктирная прямая 1 рис. 7) характеризует общий газовый поток  $Q$ , в общем случае состоящий из потоков газовыделения и натекания. Если после установления нового сорбционно-

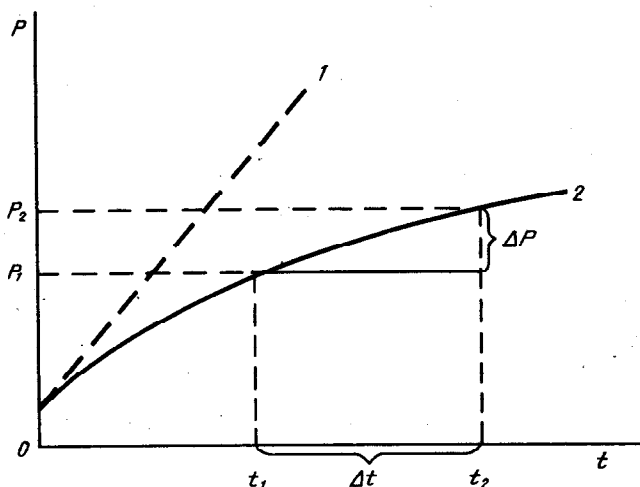


Рис. 7. Зависимость изменения давления  $P$  от времени  $t$  в изолированной вакуумной системе

го равновесия (момент  $t_1$ ) кривая переходит в горизонтальную прямую - натекание отсутствует. Продолжающееся линейное нарастание давления служит мерой натекания (кривая 2)

$$Q_{\text{нат}} = V \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (20)$$

Оценить степень герметичности оболочки, находящейся под откачкой, можно по изменению показаний вакуумметра при вакуумировании внешнего пространства (легко реализуется в вакуумных системах с двойными стенками) или при замене в нем воздуха на ПВ. Изменение показаний неабсолютного вакуумметра при этом может быть обусловлено тремя факторами:

- различной скоростью натекания воздуха и ПВ через течи (соответственно потоки  $Q_{\text{в}}$  и  $Q$ );
- различной быстротой откачки воздуха ( $S_{\text{в}}$ ) и пробного вещества ( $S$ ) насосами испытываемой системы;
- различной чувствительностью манометрического преобразователя ( $K_{\text{в}}$  и  $K$ ).

Для получения максимального эффекта рекомендуется применять такое ПВ, при котором все три фактора по возможности действовали бы в одну сторону, вызывая увеличение или уменьшение показаний вакуумметра,

$$\frac{K Q S_{\text{в}}}{K_{\text{в}} Q_{\text{в}} S} \gg 1 \quad \text{или} \quad \frac{K Q S_{\text{в}}}{K_{\text{в}} Q_{\text{в}} S} \ll 1.$$

Наиболее полно этому условию отвечают жидкие ПВ - ацетон, бензин, спирт и др. Чувствительность к их парам ионизационного манометра, например, в 4-5 раз выше, чем к воздуху, а быстрота откачки пароструйным насосом ниже (велика молекулярная масса ПВ). Количество перетекающей через течь жидкости существенно превышает количество воздуха вследствие ее большой плотности. И тем не менее не представляется возможным рекомендовать жидкие ПВ к широкому применению. Здесь играют роль пожароопасность и токсичность растворителей. Существенно сказывается на сигнале вакуумметра инерционность проникновения жидкостей через реальные течи со сложной структурой каналов.

При работе с жидкостями вероятен и побочный эффект - замерзания жидкостей в каналах течей или засорение течей твердыми частицами, взвешенными в жидкости либо смываемыми с поверхности. Вакуумметр реагирует на подобные яв-



ления уменьшением показаний. Место течи может быть определено по изменению показаний вакуумметра при подаче ПВ на отдельные участки поверхности.

Чувствительность испытаний зависит от общего уровня достигнутого давления, определяющего рабочую шкалу вакуумметра, на которой может вестись наблюдение за появлением сигнала о натекании. Весьма грубая в условиях форвакуума, она может при сверхвысоком вакууме превзойти чувствительность масс-спектрометра.

Снизить влияние общего давления в системе испытаний можно созданием на базе вакуумметров специальных течеискательных устройств. В простейшем случае это могут быть два преобразователя, присоединенные к испытываемой системе и включенные навстречу друг другу или в мостиковую схему так, что компенсируются не только фоновые сигналы, но и их флуктуации, возникающие вследствие нестабильности питания и откачки. В схеме сравнения один из преобразователей может быть подключен к испытываемой системе через сорбционную ловушку, сорбирующую все газы, кроме пробного, или, наоборот, избирательно поглощающей ПВ. Острота реакции на течь в этом случае увеличивается.

Устранить влияние общего давления при поиске течей можно, присоединяя преобразователь к вакуумной системе через мембрану, избирательно проницаемую для ПВ. Известен, например, вакуумметрический водородный течеискатель с палладиевой мембраной, который, однако, в настоящее время реально не применяется. Принципиально аналогичен ему диффузионно-магниторазрядный (ДМР) индикатор гелия, содержащий в качестве преобразователя отпаянный при высоком вакууме миниатюрный магниторазрядный насос, снабженный тонкой ( $\approx 5-10$  мкм) прогреваемой кварцевой мембраной, проницаемой для гелия. Благодаря откачивающему действию магниторазрядного насоса внутри преобразователя поддерживается низкое давление остаточных газов ( $\approx 10^{-10}-10^{-12}$  Па), которому соответствует низкий ток самостоятельного газового разряда ( $\approx 10^{-10}$  А и ниже). Появление гелия с внешней стороны мембраны сопровождается его диффузией внутрь преобразователя, что приводит к возрастанию разрядного тока, пропорциональному величине парциального давления гелия перед мембраной. Подогрев мембраны увеличивает интенсивность диффузии гелия и уменьшает время его проникновения через мембрану. Соответственно возрастают чувствительность и быстродействие ДМР-преобразователя.

По пределу обнаружения гелия ( $p_{\text{мин}} \approx 10^{-2}$  Па) описанный прибор существенно уступает масс-спектрометрическим анализаторам. Однако его чувствительность не изменяется с увеличением общего давления газов с внешней стороны мембраны вплоть до атмосферного. Эта особенность наряду с простотой устройства, высокой экономичностью, малыми размерами и массой позволила применить его при контроле герметичности замкнутых оболочек малогабаритных герметизированных изделий (см. раздел 3.1).

## 2.7. ВАКУУММЕТР - ТЕЧЕИСКАТЕЛЬ ВТИ-1

Для обнаружения течей в вакуумных системах удобен вакуумметр - течеискатель ВТИ-1, отличающийся простым устройством и небольшой стоимостью, позволяющий измерять общее давление откачиваемых газов в диапазоне

$5 \cdot 10^{-6} - 10^{-1}$  Па и индицировать течи с применением в качестве ПВ электроотрицательных паров и газов. ВТИ-1 представляет собой магниторазрядный вакуумметр, состоящий из магнетронного манометрического преобразователя (ПММ-42), присоединяемого к вакуумной системе, и небольшого измерительного блока (в панельном исполнении) с выносным электрометром. Особенностью преобразователя является то, что его анод выполнен в виде сетки, расположенной между стержневым катодом и дополнительным цилиндрическим электродом, служащим коллектором отрицательных ионов. Такое устройство позволяет измерять общую величину разрядного тока, пропорционального суммарному давлению остаточных газов (ток в цепи анод-катод), и величину тока, создаваемого отрицательными ионами, образующимися в результате захвата медленных электронов молекулами электроотрицательных веществ (ток в цепи катод-коллектор). Выделение отрицательных ионов из общего потока отрицательных частиц, проникающих из разрядного промежутка через сетчатый анод, происходит в пространстве между анодом и коллектором, свободном от электрических полей. Магнитное поле искривляет траектории движения электронов и возвращает их к аноду, тогда как тяжелые отрицательные ионы свободно достигают коллектора.

В качестве ПВ при поиске течей с помощью ВТИ-1 используются хладон 12 и элегаз, являющиеся химически инертными веществами, обладающими высокой упругостью паров, не вызывающими коррозии конструкционных материалов

и не оказывающими вредного биологического действия. Пределы обнаружения изменений парциального давления  $p$  указанных ПВ улучшаются с уменьшением общего давления остаточных газов  $P$ , и при  $P < 10^{-3}-10^{-4}$  Па значения  $\Delta p_{\text{мин}}$  могут достигать  $10^{-8}-10^{-9}$  Па. Минимальные регистрируемые натекания ПВ в проверяемую систему зависят от эффективной быстроты откачки данного ПВ ( $S_3$ ) и при известных значениях последней могут оцениваться по формуле (13).

ВТИ-1 рекомендуется к применению для проверки герметичности безмасляных вакуумных систем, в особенности подвергаемых частому вскрытию (посты откачки ЭВП, напылительные установки, установки вакуумного отжига и т.п.). Наличие в системе паров масел, образующих отрицательные ионы, ограничивает чувствительность ВТИ-1 в связи с высоким уровнем фоновых сигналов.

## 2.8. ЭЛЕКТРОНОЗАХВАТНЫЙ МЕТОД

Электронозахватный (ЭЗ) метод основан на регистрации утечек из проверяемых объектов (или натеканий) электроотрицательных ПВ. С примером использования таких ПВ мы уже встречались в случае ВТИ-1, предназначенного для оснащения высоковакуумных систем в качестве штатного течеискателя. Значительно шире область применения универсальных ЭЗ-течеискателей, не требующих вакуумирования проверяемых объектов. К ним относятся электронозахватный радиоизотопный течеискатель 13ТЭ-9-001, выпускаемый промышленностью, и плазменный течеискатель.

Течеискатель 13ТЭ-9-001 рассчитан на самостоятельное применение при поиске течей способом шупа, при проверке общей герметичности изделий и оборудования, а также на работу в составе высокопроизводительных автоматизированных установок контроля герметичности изделий массового производства. С использованием в качестве ПВ элегаза течеискатель позволяет обнаруживать течи до  $10^{-9}-10^{-10}$  м<sup>3</sup> Па/с и устанавливать их местоположение с точностью до 0,5-1 мм. С высокой чувствительностью обнаруживаются утечки хладонов и других электроотрицательных веществ. Течеискатель отличается высоким быстродействием, стабильностью чувствительности, простотой эксплуатации, высокой надежностью, экономичностью, малыми размерами и массой, малым временем подготовки к работе. Конструктивно он выполнен в виде

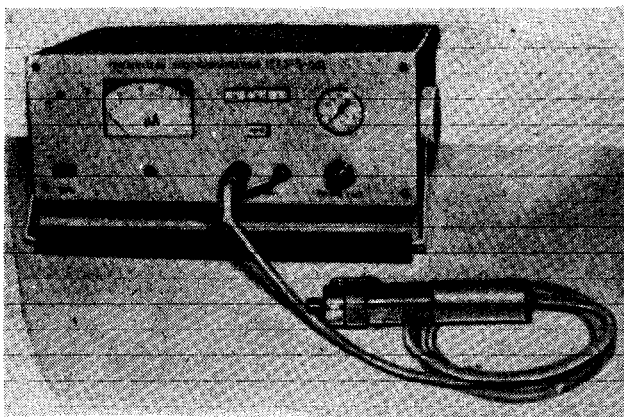


Рис. 8. Электрозахватный течеискатель 13ТЭ-9-001

портативного переносного прибора с вынесенным щупом-преобразователем (рис. 8). В корпусе преобразователя (рис. 9) расположен чувствительный элемент - ЭЗ - детектор, представляющий собой двухэлектродную ионизационную камеру с радиоизотопным (третиевым) источником ионизирующего  $\beta$  - излучения (оно полностью поглощается металлическими стенками преобразователя, что обеспечивает безопасность работы). Через детектор продувается электроположительный газ-носитель (азот или аргон), ионизация которого обеспечивает протекание электрического тока между электродами детектора, находящимися под небольшой разностью потенциалов. Появляющиеся в газе-носителе молекулы электроотрицательных ПВ захватывают электроны, освобождающиеся при ионизации газа-носителя. Образующиеся отрицательные ионы, обладающие малой подвижностью в газовой среде, находящейся при атмосферном давлении, рекомбинируют с положительными ионами газа-носителя. Это приводит к уменьшению электропроводности детектора, регистрируемому высокочувствительным измерительным устройством.

При поиске течей газ-носитель подается в детектор через эжекторное устройство, перед диффузором которого создается некоторое разрежение, обеспечивающее отбор воздуха от поверхности проверяемого объекта через полую иглу-зонд, установленную в передней части преобразователя. Наличие в воздухе электроотрицательного вещества - кислорода заставляет ограничивать отбор воздуха, так как при слишком высокой его концентрации возрастает фоновый сигнал течеискателя и снижается его чувствительность. Отбор воздуха регули-

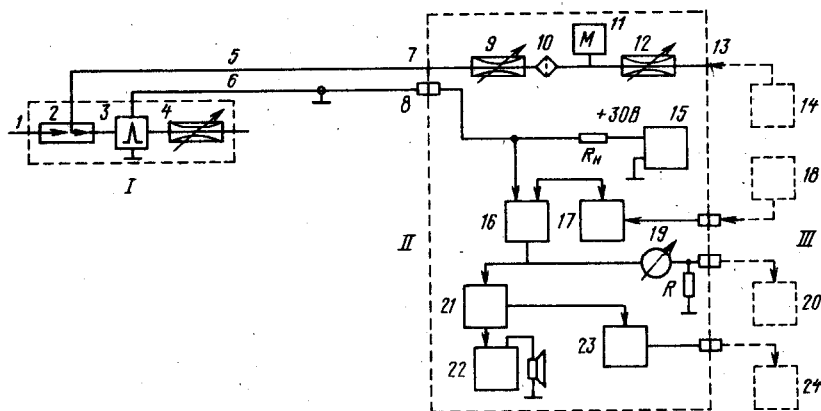


Рис. 9. Структурная схема электрозахватного течеискателя 13ТЭ-9-001

I. - шуп-преобразователь, II - измерительный блок; III - внешние устройства

1 - полая игла-зонд; 2 - эжектор; 3 - детектор; 4 - дроссель для регулирования отбора воздуха; 5 - газоповодящая трубка; 6 - экранированный провод; 7 и 13 - штуцеры измерительного блока; 8 - разъем; 9 - подстроечный дроссель; 10 - фильтр; 11 - манометр для контроля расхода газа; 12 - дроссель для регулирования расхода газа; 14 - внешний источник газа-носителя; 15 - стабилизированный источник напряжения для питания детектора; 16 - усилитель; 17 - устройство автоматической компенсации сигнала течеискателя; 18 - внешнее устройство для автоматического управления компенсацией сигнала; 19 - измерительный прибор; 20 - внешнее устройство для автоматической записи сигнала; 21 - компаратор; 22 - звуковой генератор сигнализации течи; 23 - исполнительное реле компаратора; 24 - внешнее устройство сигнализации брака (или устройство для автоматической отбраковки негерметичных изделий)

руется изменением положения эжекторного сопла относительно диффузора или уменьшением проходного сечения выходного канала детектора. Чувствительность к кислороду зависит от вида газа-носителя. Поэтому при поиске течей предпочтительно использовать аргон, позволяющий в несколько раз увеличить отбор воздуха в сравнении с азотом. При этом повышается стабильность фонового сигнала и увеличивается быстродействие течеискателя. В результате возрастает его динами-

ческая чувствительность, характеризующая реакцию течеискателя на кратковременное воздействие ПВ. Реакция течеискателя на одну и ту же концентрацию элегаза в газе-носителе в случае азота и аргона примерно одинакова, но при регистрации фреона 12 использование аргона заметно увеличивает реакцию течеискателя.

При регистрации утечки ПВ с накоплением его в чехле или камере, наполненной воздухом, отбор воздуха в преобразователь течеискателя производится также с помощью зонда. В этом случае использование в качестве газа-носителя аргона позволяет в несколько раз увеличить отбор воздуха и соответственно повысить чувствительность обнаружения утечек ПВ за счет увеличения его концентрации в газовой смеси, поступающей в детектор. Еще большую чувствительность обеспечивает помещение испытываемого объекта в камеру, продуваемую газом-носителем, который подается затем в детектор течеискателя через штуцер, устанавливаемый на входе преобразователя взамен иглы-зонда. В этом случае использование аргона предпочтительно только при регистрации утечек фреона 12.

Измерительный блок течеискателя обеспечивает регулирование и контроль расхода газа-носителя, подаваемого в преобразователь, электрическое питание и измерение электропроводности детектора. Источником газа-носителя может служить снабженный газовым редуктором баллон высокого давления со сжатым азотом или аргоном либо газовая магистраль. Чистота газа-носителя должна соответствовать требованиям, предъявляемым к техническим газам. Содержание в нем кислорода не должно превышать  $1 \cdot 10^{-2}\%$  по объему.

Измерительный блок снабжен стрелочным прибором и акустическим индикатором течи с регулируемым порогом срабатывания. Фоновый сигнал течеискателя автоматически компенсируется при нажатии кнопки на лицевой панели измерительного блока. Цепь управления системой автокомпенсации фона и выход порогового устройства (компаратора) выведены на разъем, к которому в случае применения течеискателя в автоматизированных установках контроля герметичности подключаются внешний автоматический выключатель системы автокомпенсации фона и исполнительные устройства системы автоматической отбраковки негерметичных изделий и сигнализации брака.

Применение ЭЗ-течеискателя весьма эффективно при поиске течей в высоковольтных электротехнических устройствах



пательных ПВ, получившая название "Плазменный течеискатель".

Течеискатель, предназначенный для поиска течей способом щупа, действует следующим образом (рис. 10). Через стеклянную разрядную трубку-натекатель, расположенную между обкладками плоского конденсатора, подключенного к высокочастотному генератору, при помощи механического вакуумного насоса прокачивается воздух. При давлении 10–30 Па в трубке возникает тлеющий разряд, который шунтирует контур и вызывает срывы ВЧ-генерации. Ионы рекомбинируют, и добротность контура повышается. Генератор вновь возбуждается, ионизируя газ в трубке, и процесс повторяется с определенной частотой. Появление в трубке электроотрицательных ПГ увеличивает скорость рекомбинации ионов, и частота срывов генерации возрастает. В результате на выходе генератора возникают радиоимпульсы, измеряемая частота которых пропорциональна концентрации электроотрицательной примеси в воздухе, прокачиваемом через разрядную трубку. На выходе частотомера появляется сигнал, регистрируемый стрелочным прибором и индуцируемый звуковым индикатором течи. При отсутствии в воздухе электроотрицательных примесей и скомпенсированном фоновом сигнале прибор показывает нуль.

Течеискатель выполнен в виде портативного переносного прибора, состоящего из измерительного блока с габаритными размерами 250×100×220 мм (масса 2 кг) и преобразова-

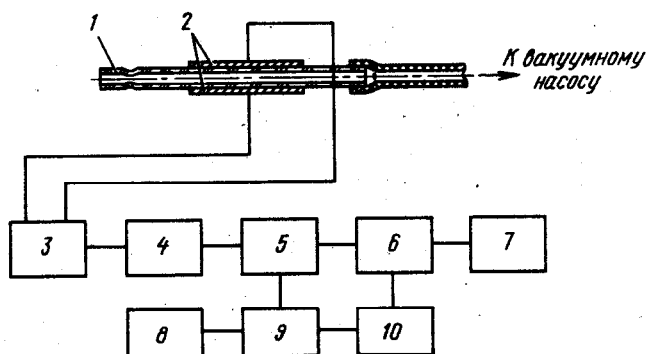


Рис. 10. Структурная схема плазменного течеискателя

1 - разрядная трубка-натекатель; 2 - электроды/обкладки конденсатора/; 3 - ВЧ-генератор; 4 - усилитель; 5 - делитель частоты; 6 - измеритель частоты; 7 - устройство компенсации сигнала; 8 - блок звуковой сигнализации; 9 - ключ; 10 - компаратор



теля-шупа. Последний конструктивно оформлен в виде пистолета со съемной рукояткой. Его размеры 175x120x34 мм, масса 0,4 кг. В корпусе преобразователя смонтированы разрядная камера, регулируемый игольчатый натекаль и ВЧ-генератор. Преобразователь через гибкий шланг соединяется с внешним механическим вакуумным насосом. Предел обнаружения утечек элегаза, быстродействие, точность установления местоположения течей плазменным течеискателем — примерно такие же, как у рассмотренного выше течеискателя с радиоизотопным детектором.

## 2.9. КАТАРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

Катарометрический метод (КМ) применяется для поиска течей в объектах, наполненных газами, отличающимися от воздуха по теплопроводности. В качестве ПГ могут применяться аргон и углекислый газ (их относительная теплопроводность по отношению к воздуху составляет  $\approx 0,7$ ), водород, гелий и фреоны 12 и 22 (относительная теплопроводность — 7, 6, 7 и 9), а также другие газообразные вещества. Течи

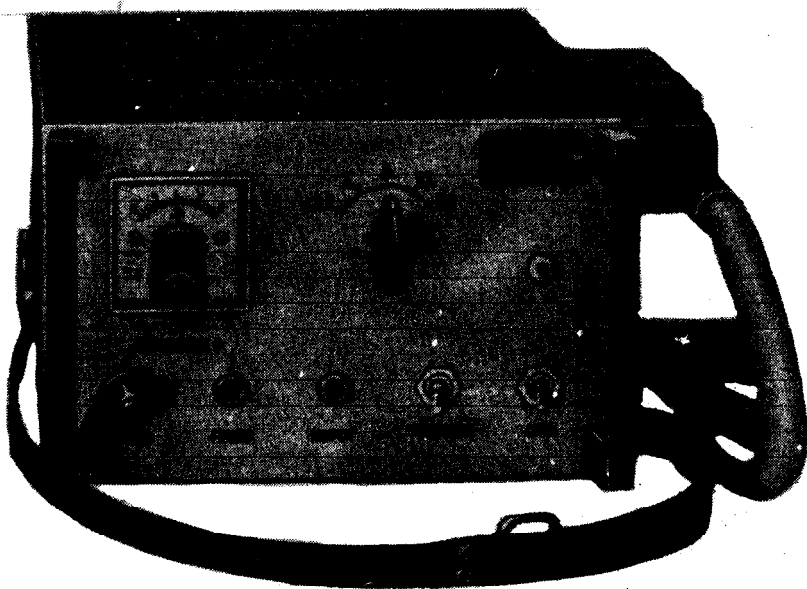


Рис. 11. Катарометрический (газоаналитический) течеискатель ТП7101М

обнаруживаются по изменению теплопроводности газо-воздушной смеси, отбираемой в месте расположения дефекта шупом КМ-течеискателя. Отечественной промышленностью выпускается КМ-течеискатель ТП 7101М (рис. 11), названный в производстве газоаналитическим. Он выполнен в виде портативного измерительного блока, к которому гибким шлангом присоединяется шуп-преобразователь. В массивном медном корпусе преобразователя расположены две катарометрические ячейки (рабочая и сравнительная), представляющие собой цилиндрические каналы, в которых натянуты тонкие платиновые нити, включенные в схему электрического моста и нагреваемые электрическим током. Выходные отверстия ячеек соединены с общим побудителем расхода газа, размещенным в измерительном блоке. Газ поступает в ячейки через две тонкие трубки, спаянные вместе, но имеющие разную длину - в рабочую ячейку газ отбирается через более длинную трубку.

Балансировка моста производится при удалении шупа от проверяемого изделия, когда через обе ячейки просасывается воздух. Присутствие в нем примесей, изменяющих его теплопроводность, не нарушает балансировки мостовой схемы. Не влияют на показания течеискателя и небольшие колебания температуры окружающего воздуха.

При приближении к месту течи трубки, соединенной с рабочей ячейкой, в последнюю поступает воздух с примесью ПГ, тогда как в ячейку сравнения через более короткий канал продолжает поступать окружающий воздух. В результате различной теплопроводности газов, проходящих через рабочую и сравнительную ячейки, температура нитей и их электрическое сопротивление оказываются разными, и балансировка моста нарушается. Сигнал течеискателя индицируется стрелочным прибором и звуковым сигнализатором (с головными телефонами). Чувствительность КМ-течеискателей невелика. Однако, благодаря простоте, портативности и возможности работы с широким кругом ПГ эти приборы часто применяются для предварительного выявления грубых течей перед высокочувствительным контролем или при испытаниях объектов, к герметичности которых предъявляются невысокие требования.

#### Основные характеристики течеискателя ТП7101М:

Минимальная величина регистрируемой утечки гелия,  
 $\text{м}^3 \text{Па/с} \dots \dots \dots 2,3 \cdot 10^{-6}$

Питание автономное . . . . . - от батареи элементов типа 336 ("Рубин")

Габаритные размеры, мм:

измерительного блока . . . 260 x 210 x 210

щупа . . . . . 142 x 34 x 34

Общая масса, кг . . . . . 4

## 2.10. ПРОЧИЕ МЕТОДЫ ТЕЧЕИСКАНИЯ

Пузырьковый метод может быть применен для предварительных испытаний на герметичность отдельных узлов оборудования. Испытуемый объект заполняется воздухом под избыточным давлением и погружается в жидкость или смачивается снаружи мыльным раствором. В местах течей образуются пузыри. Пузырьковый метод используется и для отбраковки малогабаритных газонаполненных изделий с большими течами (см. раздел 3). Проводя пузырьковые испытания, следует иметь в виду, что они могут воспрепятствовать последующим, более чувствительным испытаниям, поскольку малые течи могут оказаться перекрытыми жидкостью. Для того, чтобы уменьшить вероятность затягивания жидкости в капиллярные каналы течей, рекомендуется просушивать проверенные изделия, а затем только сбрасывать избыточное давление. Надежное освобождение каналов течей от влаги обеспечивает прогрев до температур, превышающих  $350^{\circ}\text{C}$ .

Химические методы основаны на химическом взаимодействии проникающего через течи ПВ с проявляющим (индикаторным) веществом, приводящем к появлению цветных пятен. В качестве ПВ, например, может использоваться аммиак, а в качестве проявляющего вещества - азотнокислая ртуть, которой смачивается бинт, накладываемый на поверхность испытуемого объекта. Порог чувствительности таких испытаний  $\approx 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ . Существенно повышается чувствительность химического метода течеискания в случае применения каталитических реакций, - микродобавка катализатора к ПВ значительно ускоряет цветную реакцию между малым количеством проникающего через течь ПВ и специально подобранными компонентами индикаторного состава, наносимого на поверхность. С применением таких составов можно ознакомиться, например в работе [7]. Реакции, протекающие в присутствии катализаторов, весьма специфичны, так что цвет индикаторного

состава не меняется под действием побочных продуктов окружающей среды.

Особое место в технике течеискания занимают капиллярные методы цветные и люминесцентные. Они рекомендуются к применению, в основном, при отработке технологии и анализе брака, поскольку обеспечивают возможность визуального наблюдения устья течей, а в случае изготовления шлифов с разрезом по месту течи – структуры каналов течей. Цветные индикаторы просматриваются в видимом свете, люминесцентные – при ультрафиолетовом облучении. Правила проведения испытаний капиллярными методами и применяемые при этом ПВ и проявляющие материалы определены ГОСТ 18442–80.

Ультразвуковые течеискатели фиксируют акустические колебания, создаваемые струями перетекающих через течи газообразных и жидких веществ. Колебания эти, лежащие в области высоких частот, превышающих 30 кГц, могут быть отделены от посторонних шумов производственных помещений. Этим методом обнаруживаются только весьма грубые течи, заведомо превышающие  $10^{-4} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$  [5].

Инфракрасный метод течеискания разработан на основе абсорбционной инфракрасной спектрометрии и рекомендуется для обнаружения утечек закиси азота, обладающей специфическим спектром поглощения энергии в инфракрасной области [6].

### 3. КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

#### 3.1. ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ С ЗАМКНУТЫМИ ОБОЛОЧКАМИ

Отсутствие свободного доступа к внутренней полости герметизированных изделий определяет специфику их испытаний, необходимость применения специальных способов проверки их герметичности. Наряду с этой общей особенностью выбор способов испытания герметичности конкретных типов изделий определяется предъявляемыми к ней требованиями, назначением и принципом действия изделий, а также характером рабочей среды, заполняющей их оболочки.

По характеру среды – наполнителя герметизированные изделия приборостроения можно разделить на три группы:

1. Вакуумные, в частности, электровакуумные приборы.
2. Изделия со специфическим газовым наполнением, в частности, газоразрядные приборы.

3. Изделия с оболочками, наполненными сухим воздухом или каким-либо иным газом, не участвующим в рабочем процессе.

К герметичности приборов, относящихся к двум первым группам, обычно предъявляются весьма высокие требования, так как даже незначительные количественные или качественные изменения их рабочей среды могут привести к ухудшению технических характеристик. Необходимые пределы обнаружения течей, нередко достигающие  $10^{-13}+10^{-14}$  м<sup>3</sup> Па/с и ниже, не могут быть обеспечены применением обычных средств высокочувствительного течеискания (например, МС-течеискателей) – эффективному их использованию препятствует отсутствие возможности сообщить с течеискателем полость изделия или наполнить ее ПВ. Исключение могут составлять лишь изделия, содержащие и притом при достаточно высоком парциальном давлении гелий или иной газ, утечки которого с требуемой чувствительностью могут быть обнаружены существующей течеискательной аппаратурой.

Такое положение приводит к тому, что в производстве изделий двух первых групп высокочувствительный контроль герметичности (с применением МС-аппаратуры) производится только до окончательной их герметизации. Регистрация изменений рабочих характеристик приборов после определенной их вылежки или производственной тренировки позволяет отбраковывать изделия только с грубыми течами. Из сказанного, однако, нельзя делать вывод, что высокочувствительная проверка рассматриваемых приборов вообще невозможна. Для ряда типов приборов, относящихся к первой и второй группам, предложены способы испытаний, обеспечивающие достаточно высокую чувствительность обнаружения течей. Существо этих способов, основанных на использовании вакуумметрического или параметрического методов контроля герметичности, заключается в опрессовке приборов ПВ, не откачиваемым газопоглотителями (если они имеются в приборах), и в последующей регистрации его проникновения в негерметичные приборы по повышению в них общего давления (вакуумметрический метод) или по изменению состава их газовой среды, влияющему на какие-либо рабочие параметры приборов (параметрический метод). Проверка герметичности электровакуумных приборов обычно производится вакуумметрическим методом с использованием в качестве ПГ аргона или гелия (в случае приборов со стеклянными оболочками необходимо учитывать проницаемость стекол для гелия). Регистрация натекания ПГ осуществляется с использованием собственной электродной

системы прибора, включаемого в специальный вакуумметрический режим. Отработка таких режимов производится индивидуально для каждого типа приборов. Мощные электровакуумные приборы часто снабжаются встроенными ионно-геттерными или магнеторазрядными насосами, обеспечивающими поддержание в них рабочего вакуума. Наличие таких устройств облегчает проверку герметичности, так как они, как правило, позволяют с высокой чувствительностью контролировать достигаемое разрежение и индицировать натекания ПВ.

Герметичность изделий, чувствительных к составу рабочей среды, можно контролировать параметрическим методом с предварительной их опрессовкой газообразным или жидким ПВ, оказывающим достаточно заметное влияние на измеряемые параметры изделий. Действие ПВ должно проявляться сразу же после проникновения его в оболочку изделия. По прекращении поступления ПВ изменение характеристик изделия должно прекращаться, т.е. ПВ не должно вызывать необратимых изменений, усиливающихся со временем. В противном случае данный метод оказывается разрушающим для определенной части годных изделий с очень малыми течами, не обнаруживаемыми при испытаниях, — проникновение в них ПВ приведет к постепенному их разрушению и преждевременному выходу из строя.

Третья группа герметизированных изделий является наиболее многочисленной, как по количеству входящих в нее типов и разновидностей приборов и изделий, так и по объемам их производства. К ней относятся дискретные полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы и микросборки, многие виды радиодеталей и ряд других приборов и изделий, герметизируемых для защиты от вредных воздействий окружающей среды (в первую очередь — влаги) и повышения их надежности и долговечности. К герметичности изделий этой группы предъявляются менее жесткие требования, чем в случае двух первых групп, однако и технология их герметизации пока еще менее совершенна, что ставит производство перед необходимостью стопроцентного контроля всей выпускаемой продукции. При этом методы и способы ее испытаний должны обеспечивать не только надежное обнаружение течей в заданном диапазоне, но также и высокую производительность и возможность автоматизации испытаний, в особенности отбраковки негерметичных изделий. Комплексное решение этих задач требует создания специального производственного оборудования на основе применения высокочувствительных и быстродействующих течеискателей. Некоторые типы такого оборудова-

ния рассматриваются в следующем разделе. Однако, прежде чем перейти к их обсуждению, полезно кратко остановиться на особенностях проверки герметичности изделий данной группы.

Отсутствие специальных требований к среде — наполнителю изделий, помимо того, что она должна быть нейтральной по отношению к конструкционным материалам, упрощает технологию изготовления, так как герметизация может производиться в атмосфере сухого воздуха или азота. Газ-наполнитель может использоваться и для проверки герметичности изделий, например пузырьковым, вакуумметрическим или монотрическим методами. Однако достигаемые при этом пределы обнаружения течей  $\approx 10^{-5} - 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$  недостаточны для подавляющего большинства изделий. Для того, чтобы обеспечить необходимую степень герметичности

$\approx 10^{-9} - 10^{-10} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$  требуется применение специальных ПВ, проникновение которых через течи можно было бы зафиксировать с помощью высокочувствительной аппаратуры. При этом возможны два способа выявления негерметичных изделий. Один из них заключается в том, что проверяемые изделия опрессовываются ПВ, после чего негерметичные изделия обнаруживаются по присутствию в них ПВ, с помощью внешнего устройства, способного "увидеть" его через оболочку изделия. Осуществить это на практике можно, например в случае, так называемого, радиоактивного (радиоизотопного) метода контроля, довольно широко применяемого в некоторых зарубежных странах. Этот метод предполагает опрессовку проверяемых изделий в радиоактивном газе криптона-85 (или в смеси  $^{85}\text{Kr}$  с обычным криптоном) и последующую регистрацию с помощью радиометрической аппаратуры количества этого газа, попавшего в негерметичные изделия. Режим опрессовки (время и давление) задается в соответствии с требуемой чувствительностью контроля герметичности. Влияние на результаты контроля поверхностной сорбции ПГ устраняется применением измерительной системы со счетчиком  $\gamma$ -квантов и детектором  $\beta$ -частиц, позволяющей по разнице в интенсивности  $\gamma$  и  $\beta$ -излучений отличить поверхностную сорбцию от проникновения радиоактивного газа внутрь изделий (в первом случае регистрируются оба вида излучения  $^{85}\text{Kr}$ , находящиеся в определенном соотношении, во втором — только  $\gamma$ -излучение, так как  $\beta$ -излучение полностью поглощается оболочкой изделия).

Радиоизотопный метод характеризуется высокой чувстви-

тельностью (при опрессовке изделий  $^{85}\text{Kr}$  при давлении 0,3–0,5 МПа в течение нескольких часов могут обнаруживаться течи до  $10^{-11} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ ) и позволяет автоматизировать разбраковку изделий. Однако в отечественной промышленности он пока не нашел применения главным образом из-за трудностей обеспечения радиационной безопасности в производственных условиях.

Широкое распространение в отечественном приборостроении получил другой способ высокочувствительного контроля герметичности, при котором присутствие в негерметичных изделиях ПВ, введенного в них посредством опрессовки, обнаруживается по последующей его утечке. В качестве ПВ обычно используется гелий, утечки которого фиксируются с помощью МС-течеискателей способом вакуумной камеры. Для уменьшения фоновых сигналов, создаваемых гелием, сорбирующимся на наружных поверхностях изделий, последние перед проверкой в течение некоторого времени выдерживаются на воздухе – в обычных условиях или с подогревом до максимальной рабочей температуры, допускаемой для изделий данного типа. В результате оказывается возможным уверенно регистрировать утечки гелия  $\approx 10^{-10} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ .

При минимальной величине регистрируемой утечки ПГ  $Q_{\text{мин}}$  предел обнаружения малых течей (соответствующих молекулярному режиму течения)  $V_{\text{мин}}$  в изделиях, подвергавшихся опрессовке при давлении  $P_0$  в течение времени  $t_0$ , определяется выражением

$$V_{\text{мин}} \approx P_a \sqrt{\frac{M}{M_v} \frac{V_{\text{и}} Q_{\text{мин}}}{P_0 t_0}} \quad (22)$$

где  $P_a$  – величина атмосферного давления ( $1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ );  $M/M_v$  – отношение молекулярных масс пробного газа и воздуха\* (для гелия 0,138);  $V_{\text{и}}$  – объем внутренней полости изделия. Отсюда видно, что высокая чувствительность при относительно небольших значениях давления и времени опрессовки достигается в случае изделий с малым объемом внут-

---

\* Формула справедлива при соблюдении условия

$$t_0 < 0,2 \frac{V_{\text{и}} P_a}{V_{\text{мин}}}$$



ренной полости. Так при  $Q_{\text{мин}} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ ,  $P_0 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и  $t_0 = 1,08 \times 10^4 \text{ с}$  (3 ч) для  $V_{\text{и}} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$  ( $10 \text{ мм}^3$ ) получим  $B_{\text{мин}} \approx 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ .

При увеличении  $V_{\text{и}}$ , например до  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  ( $1 \text{ см}^3$ ) для достижения той же чувствительности потребуется 100-кратное увеличение времени опрессовки, а при сохранении значения  $t_0$  величина  $B_{\text{мин}}$  возрастает в 10 раз. Таким образом, опрессовка изделий может не обеспечивать требуемой чувствительности их контроля. В этом случае целесообразен переход к введению ПГ в изделия во время их герметизации. Если при этом будет гарантировано наличие во всех изделиях ПГ при парциальном давлении  $p_{\text{и}}$ , предел обнаружения течей будет соответствовать уравнению

$$B_{\text{мин}} = \sqrt{\frac{M}{M_B}} \frac{P_q}{p_{\text{и}}} Q_{\text{мин}} \quad (23)$$

из которого видно, что при  $Q_{\text{мин}} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$  величина  $B_{\text{мин}}$  будет составлять  $\approx 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$  уже при  $p_{\text{и}} = 0,2 P_q$ , причем такая чувствительность будет достигаться независимо от объема полости изделий.

Переход от опрессовки к введению ПВ непосредственно в изделия не представляет непреодолимых технических трудностей и сулит немалые экономические выгоды за счет упрощения процесса испытаний, высвобождения производственных площадей, занимаемых опрессовочным оборудованием, и обслуживающего его персонала, создания благоприятных условий для полной автоматизации технологического цикла. Однако при оценке целесообразности такого перехода требуется учитывать особенности испытаний, связанные с наличием верхней границы диапазона обнаруживаемых течей. Существование верхней границы  $B_{\text{макс}}$  обусловлено неизбежными потерями ПВ через большие течи, происходящими за время пребывания изделий на воздухе между введением в них ПВ и измерением утечки. При опрессовке это время (назовем его временем выдержки  $t_{\text{в}}$ ) варьируется от минимальной величины  $t_{\text{в мин}}$ ,

соответствующей установленному времени десорбции ПВ с наружных поверхностей изделий, до максимальной величины  $t_{\text{в макс}}$ , включающей  $t_{\text{в мин}}$  и время, необходимое для

проверки на утечку ПВ всей партии опрессованных изделий. Оценка  $V_{\text{макс}}$  естественно производится для наиболее неблагоприятного случая  $t_{\text{в}} = t_{\text{в макс}}$ . Относительные потери ПВ экспоненциально возрастают с увеличением отношения  $t_{\text{в}}/V_{\text{и}}$ , что приводит к соответствующему уменьшению  $V_{\text{макс}}$ . В связи с этим изделия с малым  $V_{\text{и}}$  приходится дополнительно контролировать каким-либо методом, обеспечивающим обнаружение больших течей, а время  $t_{\text{в макс}}$  - жестко ограничивать с тем, чтобы диапазоны течей, выявляемых основным и дополнительным методами, надежно перекрывались. Это обеспечивается при выполнении условия:

$$V_{\text{макс}}(t_{\text{в макс}}) > V'_{\text{мин}}, \quad (24)$$

где  $V'_{\text{мин}}$  - нижний предел для течей, обнаруживаемых дополнительным методом. Переход от опрессовки к введению ПВ в изделия при их герметизации может оказаться неприемлемым, если технологический процесс предусматривает между герметизацией и контролем герметичности какие-либо длительные операции - измерение параметров, климатические, механические испытания и т.п.

Для обнаружения больших течей в производстве малогабаритных изделий обычно применяется пузырьковый метод. Проверка этим методом производится после контроля на малые течи, в связи с опасностью закупорки малых течей жидкостью. Она заключается в том, что изделия погружают в жидкость с высокой температурой кипения, нагретую до максимальной температуры, допускаемой для изделия данного типа. Течи обнаруживаются по пузырькам выходящего через них воздуха. При температуре 100-120°С обнаруживаются течи  $\approx 10^{-5} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ .

В случае изделий с очень малым объемом внутренней полости ( $\approx 10^{-8} \text{ м}^3$ ) такая чувствительность оказывается недостаточной для выполнения условия (24), так как даже при жестко ограниченном  $t_{\text{в макс}}$  (1 ч) течи более  $10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$  могут уже не обнаруживаться по утечкам гелия. Дальнейшее уменьшение  $t_{\text{в макс}}$  нежелательно, так как производство заинтересовано в увеличении  $t_{\text{в макс}}$ , позволяющем производить опрессовку изделий крупными партиями и обеспечить более ритмичную работу на их контроле. Поэтому, в подобных случаях повышают чувствительность пузырькового метода, для чего перед проверкой на утечку изделия предварительно

опрессовывают низко кипящей жидкостью (хладон 113). Проникая в негерметичные изделия и испаряясь при их нагревании, летучая жидкость за счет высокой упругости паров обеспечивает более интенсивное образование пузырьков, что позволяет обнаруживать течи до  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  м<sup>3</sup> Па/с.

Опрессовка изделий в жидком фреоне дает возможность заменить пузырьковый метод контроля галогенным, обеспечивающим расширение диапазона обнаруживаемых течей в сторону малых значений  $V_{\text{мин}}$  и позволяющего автоматизировать отбраковку негерметичных изделий с применением достаточно простого оборудования [2]. Однако и при сочетании масс-спектрометрического метода с галогенным процесс испытаний в целом остается сложным, трудоемким и недостаточно производительным.

В последнее время предложены два новых способа, позволяющих в едином цикле испытаний обнаруживать течи во всем необходимом диапазоне от  $10^{-9}$ – $10^{-10}$  м<sup>3</sup> Па/с до трещин, щелей и отверстий, видимых невооруженным глазом (изделия с такими дефектами легко обнаруживаются при контроле внешнего вида). В одном из случаев предложена установка УТГШ, основанная на регистрации утечек гелия. Для расширения диапазона обнаруживаемых течей (увеличения  $V_{\text{макс}}$ ) предусматривается помимо обычной опрессовки (или наполнения) изделий гелием дополнительная, но уже кратковременная (10–15 с) опрессовка, осуществляемая непосредственно на установке [3]. Изделия с большими течами, утратившие первоначальный запас гелия, вновь наполняются гелием, что и позволяет их обнаружить. Утечка гелия фиксируется двумя диффузионно-магниторазрядными анализаторами. Большие течи обнаруживаются после кратковременной выдержки изделий в изолированной от атмосферы неоткачиваемой камере, при соединении ее с датчиком первого анализатора, фиксирующего повышение содержания гелия в воздухе, наполняющем камеру. Если больших течей не обнаружено, проверка продолжается. Камера с изделием вакуумируется и в течение 15–20 с выдерживается для накопления в ней гелия. Накопленный гелий затем перекачивается в миниатюрный измерительный объем ( $\sim 0,1$  см<sup>3</sup>) второго анализатора. При этом фиксируются утечки гелия  $Q_{\text{мин}} \sim 1 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup> Па/с.

Описанный способ испытаний может быть осуществлен и с использованием масс-спектрометрических анализаторов. Однако независимо от средства регистрации утечек применение этого способа возможно только для таких изделий, сорбция гелия на поверхности которых при дополнительной опрессовке

58

не приведет к существенному увеличению фоновых сигналов и ухудшению  $V_{\text{мин}}$ .

Во втором случае используются два различных ПВ, утечки которых из негерметичных изделий одновременно регистрируются одним и тем же измерительным устройством — электронозахватным (ЭЗ) течеискателем. Малые течи обнаруживаются по утечкам элегаза, вводимого в проверяемые изделия посредством их опрессовки или наполнения при герметизации. Большие течи, через которые элегаз теряется до проверки утечки, обнаруживаются по кислороду воздуха, вытекающего из изделия. Процесс контроля предусматривает помещение изделия в камеру, изолируемую от атмосферы, продувку ее азотом для удаления воздуха, выдержку изделия в закрытой камере для накопления в ней ПГ и регистрацию примеси ПГ в азоте, содержащемся в камере.

Таким образом, в отличие от предыдущего данный способ, реализованный в полуавтомате контроля герметичности 12ГАЭ-1000-004, не требует дополнительной опрессовки изделий для обнаружения больших течей, а следовательно, отсутствует возможность ухудшения нижнего предела обнаружения малых течей  $V_{\text{мин}}$ .

Утечки элегаза  $V_{\text{мин}}$  фиксируются с пороговой чувствительностью  $Q_{\text{мин}} \approx 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ , что обеспечивает достижение  $V_{\text{мин}} \approx 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$  при давлении и времени опрессовки, существенно меньших, чем в случае применения гелия. Обладая большой молекулярной массой (146), элегаз значительно медленнее вытекает из негерметичных изделий, что позволяет в несколько раз увеличивать  $t$  и производить опрессовку изделий более крупными партиями. Стоимость элегаза выше стоимости гелия, однако, благодаря достаточно высокой температуре кипения элегаз легко конденсируется при охлаждении. Это позволяет собирать его после опрессовки и использовать многократно, практически без потерь.

Указанные преимущества рассматриваемого способа проверки герметичности малогабаритных изделий, а также простота его аппаратурной реализации, возможность полной автоматизации контрольных операций и достижения высокой производительности контроля, простота, высокая надежность и стабильность чувствительности дают основания полагать, что уже в ближайшем будущем данный способ испытаний получит широкое распространение в приборостроении. Наглядным подтверждением справедливости этого заключения может служить сравнение конструктивных особенностей и технических харак-

теристик контрольного оборудования, описания которого приводятся далее.

### 3.2. МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАМКНУТЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗДЕЛИЙ

Для производственной проверки герметичности малогабаритных изделий с замкнутыми оболочками, предварительно опрессованных или наполненных гелием, разработаны несколько разновидностей автоматизированных масс-спектрометрических установок (АКГМ-3, АКГМ-4, УКГМ-2, УКГМ-2М), принципиально мало отличающихся друг от друга. На рис.12 представлена типичная вакуумная схема такой установки, состоящей из масс-спектрометрического течеискателя Г1, вакуумно-механической системы и стойки управления (на рисунке не показана). Действие установки осуществляется следующим образом. На загрузочной позиции I изделия К по

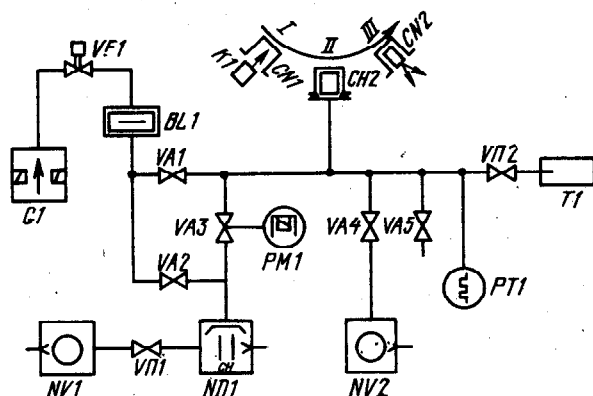


Рис. 12. Схема вакуумной системы автоматизированной масс-спектрометрической установки контроля герметичности Г1 - течеискатель; К1 - проверяемое изделие; CN1-CN3 - рабочие камеры; ND1 - паромасляный насос; NV1-NV2 - механические вакуумные насосы; BL1 - охлаждаемая (азотная) ловушка; PM1, PT1 - вакуумметрические преобразователи; VE1 - клапан с электромагнитным приводом; VA1-VA5 - клапаны с механическим приводом от кулачкового распределительного вала; VP1, VP2 - клапаны с ручным приводом; T1 - калиброванная гелиевая течь. I - позиция загрузки; II - рабочая позиция; III - позиция выгрузки - разбраковки изделий

одному или группам загружаются в камеры С N периодически поворачивающейся карусели вакуумно-механической системы. Число камер на карусели может быть разным, но обычно оно составляет не менее трех (УКГМ-2, УКГМ-2М), что позволяет, как это показано на схеме, совместить по времени загрузку, вакуумные операции, выгрузку и разбраковку изделий. С позиции загрузки камера с изделием автоматически перемещается на рабочую позицию II, где происходит ее герметичное соединение с вакуумной системой и последовательно осуществляются основные операции цикла проверки, откачки из камеры газов механическим NV 2 и высоковакуумным ND 1 насосами и соединение с течеискателем G 1. После контроля камера через клапан VA5 сообщается с атмосферой, разуплотняется и перемещается на позицию выгрузки II, где изделия вручную или автоматически выгружаются и разделяются на две группы – годные и брак. Отбраковка осуществляется автоматически – электромагнитным сортировочным устройством, управляемым сигналом течеискателя, либо вручную оператором, действующим в соответствии с показаниями светового прибора или по световому сигналу.

Механическая система установки, приводимая в действие электродвигателем, обеспечивает автоматическое перемещение камер, их уплотнение на рабочей позиции и программирование основных операций цикла проверки, осуществляемое с помощью кулачкового распределительного вала и рычажной системы, управляющих действием клапанов VA1-V A5. Для периодической проверки динамической чувствительности установки в ходе рабочего цикла предусмотрена диффузионная гелиевая течь ГЕЛИТ-1 (поз. T1). Манометрический преобразователь PM1 блокировочного вакуумметра ВЭМБ-1П используется в рабочем процессе для предварительной проверки герметичности изделий.

Вакуумметрический контроль изделий осуществляется в момент подключения камеры к высоковакуумному насосу ND1 по всплеску давления, обусловленному поступлением газов из камеры и из негерметичного изделия. Если поток газа, вытекающий из негерметичного изделия, достаточно интенсивен, и всплеск давления, регистрируемый вакуумметром, превышает установленный порог срабатывания блокировочной цепи, закрывается нормально открытый клапан VE1, и вход течеискателя блокируется. Одновременно включается механизм отбраковки или сигнализация брака, так что негерметичное изделие отбраковывается по завершении цикла проверки без соединения камеры с течеискателем. Такая блокировка защища-

ет течеискатель и при случайном нарушении уплотнения камеры на рабочей позиции.

Клапан VE1 открывается после закрытия клапана VA1 и откачки газов из соединительных коммуникаций высоковакуумным насосом ND1.

При отсутствии сигнала блокировочного вакуумметра, когда негерметичное изделие обнаруживается по утечке гелия, подключение ко входу течеискателя через клапан VA2 высоковакуумного насоса ND1 способствует быстрому удалению гелия из течеискателя после контроля изделия.

Собственный фоновый сигнал масс-спектрометрического течеискателя, автоматически компенсируется перед каждой контрольной операцией, что способствует повышению надежности результатов проверки изделий.

Установки рассматриваемого типа снабжаются также системой блокировок, автоматически прерывающей проверку изделий при большом сигнале течеискателя, не успевающем снизиться до исходного уровня за время, отведенное для откачки гелия. При уменьшении фонового сигнала до установленной допустимой величины действие установки автоматически возобновляется.

#### Основные характеристики установки УКТМ-2:

|                                                                             |                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Производительность, проверок/ч. . . . .                                     | 300-360                              |
| Максимальные размеры контролируемых изделий (высота диаметра), мм . . . . . | 50x70                                |
| Предел обнаружения утечек гелия, м <sup>3</sup> Па/с . . . . .              | $4 \cdot 10^{-11}$                   |
| Ручные операции . . . . .                                                   | загрузка,<br>выгрузка,<br>отбраковка |
| Потребляемая мощность, кВт . . . . .                                        | 5                                    |
| Габаритные размеры, мм. . . . .                                             | 2155x<br>x880x<br>x1250              |

Простотой конструкции и высокой производительностью отличается полуавтомат 12ГАЗ-1000-004, предназначенный для контроля герметичности миниатюрных изделий. Полуавтомат обеспечивает автоматическую отбраковку негерметичных изделий, обслуживаемых по утечкам из них воздуха (кислорода) или специально введенного электроотрицательного вещества (обычно - элегаза). Управление системой отбраковки

осуществляется электрозахватным течеискателем 13ТЗ-9-001.

Принцип работы полуавтомата поясняется рис. 13, на котором в несколько упрощенном виде представлена схема узла проверки изделий. Основными элементами этого узла являются: загрузочный механизм 1; устройство карусельно-шлюзовое (УКШ), образованное верхним 5 и нижним 4 неподвижными дисками и прерывисто вращающимся между ними барабаном 2 с 18-ю сквозными отверстиями — камерами 3; сортировочный механизм 9 и преобразователь 10 ЭЗ-течеискателя. Узел проверки показан на рисунке в развернутом, плоском изображении.

Проверка изделий осуществляется следующим образом. На позиции загрузки I через отверстие в верхнем диске УКШ изделие 7 загружается в камеру 3, которая затем перемещается на последующие позиции (с остановками на каждой из них). На позициях II и III камера продувается газом-носителем (азотом) для удаления из нее воздуха. Далее вплоть до позиции XVII она остается изолированной, и в это время при наличии в изделии течи происходит обмен газами между свободным объемом камеры и полостью изделия, — находящийся в изделии воздух и введенный в него элغاز частично переходят в камеру. В результате в азоте, заполняющем камеру, появляются примеси электроотрицательных веществ — воздушного кислорода и элгаса (если последний присутствовал в изделии). Содержание примесей оказывается тем большим, чем больше течь в изделии. При очень большой течи (видимые трещины, отверстия) все газы равномерно распределяются в объемах камеры и изделия.

При перемещении камеры с позиции XVII на последнюю позицию XVIII осуществляется контроль. Во время движения камеры подключается к линии подачи газа-носителя в преобразователь 10. Поток газа-носителя газ, находившийся в камере, переносится в преобразователь, который обнаруживает присутствие в нем электроотрицательных примесей и через измерительный блок течеискателя выдает сигнал — команду на срабатывание сортировочного механизма. Одновременно включается звуковая сигнализация брака и зажигается табло "Брак" на панели управления полуавтомата. При переходе камеры на позицию XVIII изделие через окно в нижнем диске выходит из камеры и через сортировочное устройство попадает в бункер-накопитель брака. Годные изделия по наклонным лоткам соскальзывают на поверхность стола полуавтомата.

Высокая степень совмещенности операций цикла проверки



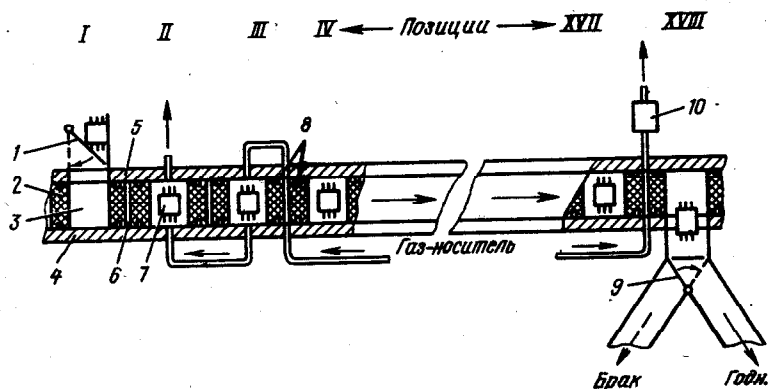


Рис. 13. Схема устройства узла проверки полуавтомата 12ГАЗ-1000-004 с электрозахватным датчиком разбраковки изделий

1 - загрузочный механизм; 2 - барабан УКШ; 3 - камера-шлюз; 4, 5 - верхний и нижний диски УКШ; 6 - канал для продувки газа-носителя через электрозахватный детектор при неподвижном положении барабана; 7 - испытуемое изделие; 8 - защитные поперечные канавки, предотвращающие перетекание ПВ из камеры в камеру; 9 - механизм разбраковки изделий; 10 - электрозахватный детектор

I - позиция загрузки, II, III - позиции продувки камер, IV-XVI - позиций накопления ПВ, XVII - позиция выгрузки-разбраковки изделий

и дробление наиболее длительных операций, достигнутые применением УКШ, обеспечили высокую производительность полуавтомата (1500 проверок/ч) при времени проверки каждого изделия  $\approx 43$  с. Большая часть этого времени (33,5 с) затрачивается на накопление ПВ в испытательной камере, что обеспечивает высокую чувствительность обнаружения утечек ПВ.

Особенностью УКШ является отсутствие в нем уплотнительных элементов. Изоляция камер от окружающей среды и друг от друга (для предотвращения газового обмена между камерами) обеспечивается системой защитных канавок, продуваемых азотом. В верхнем и нижнем дисках УКШ со стороны, обращенной к барабану, имеются продольные (дугообразные) канавки, предотвращающие натекание в камеры атмосферного воздуха (на рис. 13 они не показаны), а на верхней и нижней поверхностях самого барабана между камерами 3 и каналами продувки преобразователя 6 имеются поперечные (радиальные) канавки 8, сообщающиеся с продольными канавками дисков и изолирующие камеры друг от друга.

Система автоматической компенсации, имеющаяся в течеискателе 13ТЭ-9-001, обеспечивает компенсацию его собственного фоновых сигнала перед контролем каждой камеры. Управление системой автокомпенсации осуществляется бесконтактным выключателем, действующим синхронно с механизмом привода УКШ.

При проверке изделий с большими утечками специального ПВ последнее может сорбироваться стенками камер, а в дальнейшем – выделяться, вызывая повышенный сигнал, который мог бы привести к отбраковке годных изделий, помещаемых в такие камеры. Для устранения опасности ложной отбраковки изделий камеры, при контроле которых сработала система отбраковки (независимо от того, явилось ли причиной срабатывания негерметичное изделие или остаточная десорбция после ранее проверявшегося изделия), автоматически исключаются из рабочего процесса путем блокирования загрузки в них изделий. При этом работа полуавтомата не прерывается и все остальные камеры функционируют как обычно.

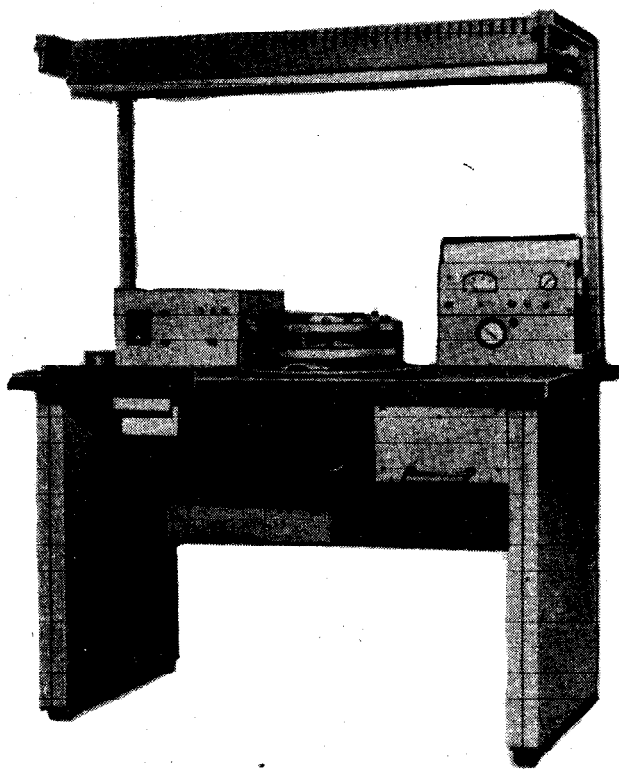


Рис.14. Полуавтомат контроля герметичности 12ГАЗ-1000-004

Конструктивно полуавтомат оформлен в виде стола с установленным над ним светильником, обеспечивающим необходимую освещенность рабочего места оператора (рис. 14), на столе смонтированы блок управления полуавтоматом, газораспределительная панель и измерительный блок ЭЗ-течеискателя. В центре стола установлено устройство проверки, выполненное в едином блоке с загрузочным и сортировочными устройствами и механизмом привода. Барабан УКШ, работающий без смазки, изготавливается из износостойчивого материала с низким коэффициентом трения - фторопласта с коксовым наполнителем, неподвижные диски - из закаленной стали. Питание полуавтомата газом-носителем осуществляется от магистрали сжатого азота.

#### Основные характеристики полуавтомата 12 ГАЗ-1000-004:

|                                       |                         |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Производительность,                   |                         |
| проверок/ч . . . . .                  | 1500                    |
| Максимальные размеры                  |                         |
| контролируемых изделий, мм . . .      | 20x20x3                 |
| Минимальные величины обнару-          |                         |
| живаемых утечек, м <sup>3</sup> Па/с: |                         |
| элегаса . . . . .                     | $1 \cdot 10^{-11}$      |
| воздуха . . . . .                     | $(0,5-1) \cdot 10^{-5}$ |
| Максимальные величины обна-           |                         |
| руживаемых течей (диаметр), мм        | 0,5-0,8*                |
| Ручные операции . . . . .             | загрузка                |
| Потребляемая мощность, кВт. .         | 0,4                     |
| Габаритные размеры, мм . . . .        | 1050 x                  |
|                                       | x 800 x                 |
|                                       | x 1400                  |

\* В случае изделий с объемом внутренней полости

$V_{\text{н}} > 20 \text{ мм}^3$ .

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какова целесообразная последовательность проведения испытаний на герметичность крупногабаритных объектов и изделий сложной конструкции?
2. Какие факторы затрудняют или делает невозможным обнаружение течей? Всякий ли сквозной дефект является течью?
3. Какие методы течеискания существуют? Как они группируются по виду применяемых пробных веществ?
4. Какие типы течеискателей выпускает отечественная промышленность?
5. Каковы принципы действия масс-спектрометрических и галогенных течеискателей?
6. В чем заключается преимущество применения высокопроизводительных высоковакуумных насосов при масс-спектрометрических испытаниях на герметичность объектов большого объема?
7. Какие существуют способы масс-спектрометрических испытаний конструкций, содержащих газ под избыточным давлением?
8. Как оцениваются по результатам испытаний степень герметичности проверяемых объектов и величины обнаруживаемых течей?
9. Какие существуют разновидности электронозахватных течеискателей?
10. В чем заключаются преимущества электронозахватных течеискателей при поиске мест течей?
11. Какими факторами определяется диапазон обнаруживаемых течей при испытаниях изделий с замкнутыми оболочками?
12. Чем ограничивается производительность контроля герметичности изделий и какие способы применяются для ее увеличения?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева Л.А., Калябина И.А., Ханьгина Л.Д. Самопроизвольное закупоривание течей в ЭВП. - Электронная техника. Сер. 1, 1974, № 1, с. 92-97.
2. Батуева Л.С., Евлампиев А.И., Ларкина В.П. Применение галогенного метода для контроля герметичности полупроводниковых приборов. - Электронная техника. Сер. 1, 1978, № 9, с. 79-83.
3. Блинников Н.М., Кузьмина В.И., Химушкин В.А. Установка автоматизированного широкодиапазонного контроля герметичности ИЭТ. Электронная промышленность, 1982, вып.9 (115), с. 53-54.
4. Ланис В.А., Левина Л.Е. Техника вакуумных испытаний. - М.: Госэнергоиздат, 1963. 264 с.
5. Селиверстов М.И. Акустический течеискатель. - Приборы и системы управления, 1973, № 6, с. 41-42.
6. Тюрин В.А. Инфракрасный газовый метод контроля герметичности и пути его развития. - Дефектоскопия, 1978, № 7, с. 18-25.
7. Использование кинетических методов анализа при контроле герметичности / К.Б. Яшимирский, А.И. Запунный, Л.И. Бударин и др. - Заводская лаборатория, 1977, № 8, с.920-922.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ . . . . .                                                                           | 3  |
| 1. ТЕХНИКА ТЕЧЕИСКАНИЯ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ :                                                    | 4  |
| 1.1. Основные виды нарушений герметичности . . . .                                           | 4  |
| 1.2. Задачи техники течеискания и пути их решения . . . . .                                  | 6  |
| 1.3. Способы количественной оценки течей . . . . .                                           | 7  |
| 1.4. Формулировка требований к герметичности . . .                                           | 12 |
| 1.5. Возможные причины невыявления течей.<br>Внутренние течи . . . . .                       | 13 |
| 2. МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ТЕЧЕИСКАНИЯ . . . . .                                                 | 16 |
| 2.1. Общая характеристика методов течеискания . .                                            | 16 |
| 2.2. Масс-спектрометрический метод и аппаратура течеискания . . . . .                        | 17 |
| 2.3. Схемы и способы испытаний с применением масс-спектрометрических течеискателей . . . . . | 24 |
| 2.4. Галогенные течеискатели . . . . .                                                       | 33 |
| 2.5. Искровой течеискатель ИО43.009 . . . . .                                                | 36 |
| 2.6. Течеискание с помощью вакуумметров . . . . .                                            | 38 |
| 2.7. Вакуумметр-течеискатель ВТИ-1 . . . . .                                                 | 41 |
| 2.8. Электронозахватный метод . . . . .                                                      | 42 |
| 2.9. Катарометрический метод . . . . .                                                       | 48 |
| 2.10. Прочие методы течеискания . . . . .                                                    | 50 |
| 3. КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ<br>ПРИБОРОСТРОЕНИЯ . . . . .                               | 51 |
| 3.1. Особенности испытаний изделий с земкнутыми оболочками . . . . .                         | 51 |

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2. Масс-спектрометрические автоматизированные установки контроля герметичности замкнутых оболочек изделий . . . . . | 60 |
| ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ . . . . .                                                                                    | 67 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ . . . . .                                                                                           | 68 |

Любовь Ефремовна ЛЕВИНА, Владимир Вячеславович ПИМЕНОВ

**МЕТОДЫ И АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ  
ВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
И ИЗДЕЛИЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

Редактор И.В. Мочарская  
Технический редактор Е.Е. Сорокина  
Корректор И.Ю. Ситникова

---

Подписано в печать 19.02.85 Т-01883 Формат 60х90 1/16  
Бумага офсетная № 2 Ротапринт Усл.-печ. л. 4,5  
Усл. кр.-отг. 4,75 Уч.-изд. л. 3,85 Тираж 1500 экз.  
Заказ 586 Бесплатно

---

Ордена Трудового Красного Знамени издательство  
"Машиностроение", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4

---

Московская типография № 9 Союзполиграфпрома при  
Государственном комитете СССР по делам издательств,  
полиграфии и книжной торговли  
109033, Москва, Волочаевская ул., 40