

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ
РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ им. С. П. КОРОЛЕВА

В. А. ЗАХАРОВ

КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СБОРКЕ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Учебное пособие по курсу
„Технология производства двигателей
летательных аппаратов“

Рассмотрено и утверждено редакционным
советом института 15 сентября 1970 года

Ответственный редактор — доцент В. А. Шманев

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

При изготовлении авиационных двигателей все входящие в них детали соединяются между собой с помощью неразъемных или разъемных соединений.

Наиболее общими требованиями, предъявляемыми к соединениям деталей и узлов двигателя, являются прочность, жесткость, долговечность. Кроме того, для большого количества соединений накладывается еще одно очень важное требование, заключающееся в том, что между соприкасающимися поверхностями деталей не должна проходить жидкая или газовая среда, т. е. соединение должно быть плотным.

В зависимости от условий работы элементов конструкции плотные соединения могут быть подразделены на абсолютно плотные (герметичные), через которые протечка газа или жидкости практически недопустима, и условно плотные соединения, через которые допускается пропуск некоторого количества газа или жидко-

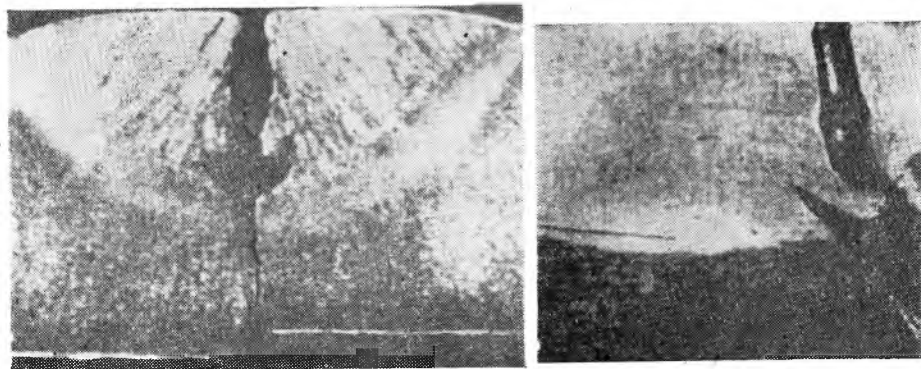


Рис. 1. Примеры образования течей в сварных швах

сти (например, соединения с уплотнением при помощи пружинных колец, манжет, сальников и т. д.).

Герметичность соединений в узлах двигателя обеспечивается как конструктивными, так и технологическими мероприятиями. Так, например, обеспечение герметичности паяных и сварных соединений достигается правильным выбором материала деталей, электрода (или флюса), методов и режимов пайки или сварки, соблюдением необходимых правил подготовки деталей и весьма тщательным и квалифицированным выполнением. Несоблюдение этих условий приводит к ухудшению качества соединений, к потере герметичности.

Наиболее характерными дефектами, влияющими на герметичность неразъемных соединений являются для сварных соединений проплавы, непровары, пористость и шлаковые включения, микротрещины (как результат тепловых и усадочных явлений); для паяных соединений непропаи, шлаковые и флюсовые включения, газовые пузыри и пористость шва, трещины в металле шва и т. п.

На рис. 1 приведен характерный вид дефектов в швах, получающихся при автоматической скоростной сварке под флюсом.

Герметичность разъемных соединений достигается методами, значительно отличающимися от неразъемных соединений. Рассмотрим для примера плотное соединение с плоской металлической уплотняющей поверхностью деталей. Если сосуд 1 (рис. 2),

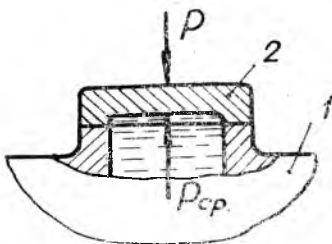


Рис. 2. Схема соединения деталей с плоской металлической уплотняющей поверхностью:
1 — сосуд; 2 — диск.

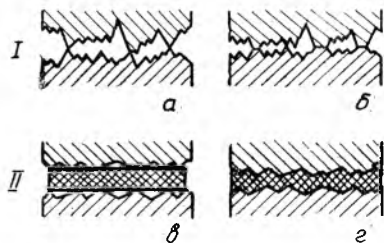


Рис. 3. Схема контактирования уплотняющих поверхностей:
I — без прокладки и II — с прокладкой; а, в — до нагружения; б, г — после нагружения.

заполненный жидкой или газовой средой и находящийся под давлением, перекрыть диском 2, то на него будет действовать сила

$$P_{cp} = q \cdot F \text{ кг},$$

где q — избыточное давление в сосуде, кг/см^2 ;
 F — площадь действия среды.

Обеспечить герметичность соединения при $P = P_{cp}$, можно лишь в том случае, если уплотняющие поверхности представляют собой идеальные плоскости. В реальных условиях обработанные поверх-

ности имеют определенную степень шероховатости и те или иные отклонения от идеальной плоскости. Поэтому, чтобы обеспечить гидравлическую плотность соединения, необходимо создать силовое взаимодействие, то есть, прижать с силой диск к сосуду и тем самым создать на уплотняющих поверхностях удельные давления, при которых неровности на соприкасающихся поверхностях деформируются (рис. 3).

Если на уплотняющих поверхностях отклонение от плоскостности велико и шероховатость значительна, то для обеспечения плотности соединения следует приложить еще большие усилия, которые создадут на уплотняющих поверхностях большие остаточные деформации. Герметичность соединения обеспечивается тем, что две поверхности подходят друг к другу настолько близко, что оставшиеся зазоры в виде капиллярных щелей затрудняют проход жидкости или газа. Величина оставшихся щелей зависит от того, насколько деформируются гребешки микронеровностей поверхностей деталей.

Для уменьшения удельного давления в стык сопрягаемых деталей часто устанавливается уплотнительная прокладка из более мягких материалов (медь, алюминий, паранит и т. п., рис. 3, в). При сборке прокладка предварительно обжимается между уплотняющими поверхностями деталей с тем, чтобы на ней отпечатался рельеф уплотняемых поверхностей (рис. 3, г.) и уплотнение перестает пропускать среду.

Наиболее характерными дефектами разъемных соединений, приводящими к разгерметизации стыка, являются нарушение качества стыковых поверхностей деталей (риски, забоины, царапины, волнистость, неплоскостность поверхности вследствие коробления деталей), трещины в материале деталей и на уплотнительных прокладках и т. п.

Приведенные примеры показывают, что современный технический уровень производства двигателей не может дать полной гарантии герметичности соединений деталей. В связи с этим после изготовления сварных узлов или сборки систем двигателя, внутренние полости которых подвержены воздействию давления жидкости или газа, необходимо производить проверку герметичности соединений. Проверка герметичности является неразрушающим методом контроля и осуществляется с помощью гидравлических и пневматических испытаний.

Основанием для проведения испытаний на герметичность как окончательно собранного изделия, так и отдельных его узлов, агрегатов, трубопроводов, арматуры, емкостей являются указания в чертежах и технических условиях, где оговаривается величина давления, время выдержки, допустимая величина негерметичности и другие параметры.

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ГЕРМЕТИЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕЧЕЙ

В зависимости от условий, в которых должен эксплуатироваться узел или магистраль изделия, к герметичности их соединений предъявляются различные требования. Негерметичность вызывает потерю продуктов, понижает коррозионную стойкость соединений, нарушает работу агрегатов и систем машины, создает опасные условия для обслуживающего персонала. В случае изолированных и находящихся под избыточным давлением сосудов требования к герметичности определяются их объемом и изменением давления в них в процессе эксплуатации (например, поплавки, анеронды).

При определении требований к герметичности конструктору иногда приходится исходить из условия допустимого повышения концентрации вещества, вытекающего из объема в окружающее пространство. Например, в области применения атомной энергетики, а также сосудов с токсичными веществами считают, что общая утечка газа через сварные или разъемные соединения не должна превышать 10^{-4} мм³·атм/час[4]. Для авиадвигателей требование герметичности определяется пожаро- и взрывоопасностью при работе изделий или при подготовке их к эксплуатации.

Жидкость или газ проникает из внутренней полости узла или системы через места нарушения герметичности, называемые течами. Общая негерметичность системы определяется проникновением жидкости или газа через все имеющиеся в объеме течи. Определение общего истечения — конечная цель всех испытаний на герметичность, позволяющих установить соответствие испытываемых объемов техническим условиям. Если истечение превышает допустимое, то в этих случаях необходимо установить место расположения отдельных течей и устранить их.

Природа течей, а следовательно, и характер проникновения сквозь них жидкостей и газов, могут быть различными. В ряде случаев это чисто диффузионный процесс. Чаще всего течь представляет собой канал совершенно неопределенной формы. Для практических расчетов потоков жидкости и газов (в очень грубом приближении) течь принято рассматривать как цилиндрический канал круглого сечения. Но даже в таком приближении весьма трудно определить диаметр и длину канала, т. е. те параметры, знание которых необходимо для расчетов. Тем самым исключается возможность характеристики течи ее расчетной проводимостью.

В зависимости от механизма проникновения через течи жидкостей и газов их можно разделить по величине эффективного диаметра на обыкновенные ($d > 0,5$ мм), макрокапиллярные ($d \approx 0,5 \div 2 \cdot 10^{-4}$ мм) и микрокапиллярные ($d < 2 \cdot 10^{-4}$ мм).

В обыкновенных течах жидкость и газ движутся по законам гидро- и аэродинамики, т. е. скорость движения определяется вяз-

костью проникающей среды (так называемый вязкостный режим истечения). Например, при вязкостном режиме расход жидкости Q через канал течи будет определяться следующей зависимостью [2]

$$Q = \frac{d^4}{b} \cdot \frac{\gamma}{\eta} (P_1 - P_2), \quad (1)$$

где d — диаметр канала течи;
 b — длина канала;
 γ — удельный вес среды;
 η — динамический коэффициент вязкости жидкости;
 $P_1 - P_2$ — разность давления по обе стороны канала.

В макрокапиллярных течах движение жидкости происходит, главным образом, под действием капиллярных сил (движение газа вязкостное). Макрокапиллярные течи не поглощают влагу даже из влажного воздуха с полным насыщением.

Движение среды в микрокапиллярных течах усложняется тем, что толщина образующейся на стенках пленки влаги ($\sim 10^{-4}$ мм), поглощаемой из воздуха, соизмерима с размерами самой неплотности. В такой пленке вода приобретает упругость твердого тела (модуль сдвига $\sim 1,9 \cdot 10^{-8}$ дин/см²). Этим объясняется трудность обнаружения микротечей с помощью жидкости или сжатого воздуха. Для их обнаружения обычно применяют газы, обладающие повышенной текучестью, например, гелий, аргон, галоидные газы и др. Движение газа в микротечах молекулярное. Прониканию жидкости (газа) в течи препятствуют абсорбционно связанный с твердой поверхностью слой жидкости, свойства которого определяют ее полярностью; отлагающиеся на стенках микротечей масляные и другие вязкие фракции, содержащиеся в пробной среде; пузырьки газа, находящиеся в жидкости.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ УЗЛОВОЙ И ОБЩЕЙ СБОРКЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

В зависимости от конструктивных особенностей двигателей, применяемой рабочей среды, величины избыточного давления контроль герметичности соединений может быть осуществлен различными методами. При выборе методов контроля обычно стремятся к тому, чтобы условия проведения испытания наиболее полно совпадали с рабочими условиями в процессе эксплуатации. Однако в сборочном цехе не всегда удается обеспечить одинаковые с эксплуатационными условия испытания. В связи с этим при выборе методов контроля герметичности необходимо, чтобы приня-

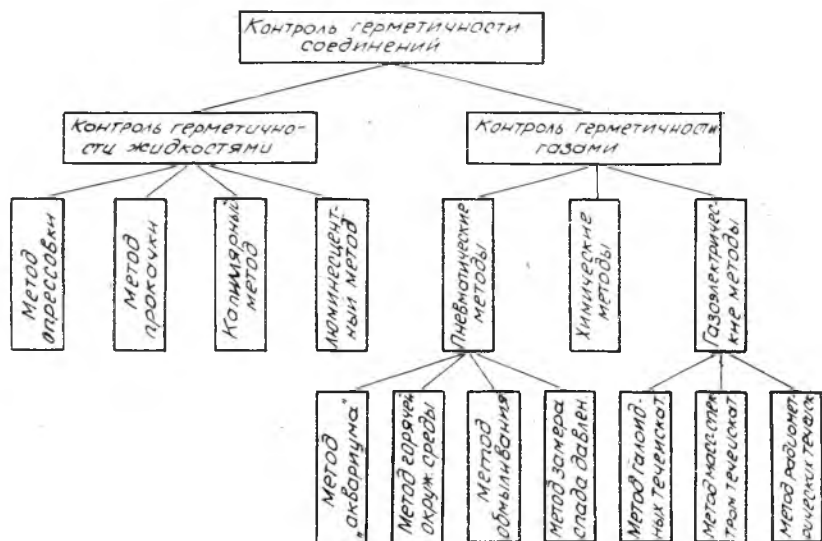


Рис. 4. Классификация методов контроля герметичности

тый метод максимально гарантировал выполнение заданных технических условий на узел или двигатель.

В настоящее время разработано сравнительно большое количество различных методов контроля герметичности соединений, которые можно классифицировать по схеме (рис. 4). Каждый из представленных на схеме методов обладает определенной чувствительностью обнаружения течей и другими характерными особенностями. Поэтому применение их целесообразно только при вполне определенных условиях сборки. Рассмотрим более подробно каждый из этих методов.

КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЖИДКОСТЯМИ

Наиболее широкое применение получили методы опрессовки, прокачки, капиллярный и люминесцентный. Контроль герметичности с помощью первых двух методов производится в узлах и системах двигателя, работающих под избыточным давлением жидкой рабочей среды, например, в топливной и масляной системах газотурбинных двигателей. Часто, особенно при изготовлении узлов ЖРД [1], гидравлические испытания методом опрессовки проводят до пневмоиспытаний с целью обеспечения безопасности работы.

Метод опрессовки

Сущность гидроиспытания методом опрессовки заключается в том, что с помощью гидронасоса в испытываемую емкость подается жидкость необходимого давления, после чего производится проверка герметичности соединений. Негерметичность определяется по появлению струйного течения, просачиванию жидкости, запотеванию мест соединений и т. п.

В качестве проверочной жидкости могут использоваться керосин, масло или вода с растворенным в ней хромпиком калиевым, техническим $K_2Cr_2O_7$ (0,3—0,5% по весу).

Схема установки для гидравлических испытаний методом опрессовки показана на рис. 5. Перед заполнением жидкостью на все выходы (отверстия, штуцеры и т. п.) испытываемого узла устанавливаются технологические заглушки, после чего во внутреннюю полость подается жидкость до момента перелива ее через штуцер, расположенный в самой верхней части узла. С целью ускорения заполнения жидкостью внутренней полости узлов особенно больших объемов часто применяют два гидронасоса: один низкого давления, но большой производительности, а второй малой производительности, но способный создать необходимое давление жидкости.

При заполнении внутренней полости узла жидкостью необходимо следить за тем, чтобы в изгибах, «карманах» и других местах не оставался воздух. При повышении давления жидкости оставшиеся воздушные пузыри сильно уменьшаются в объеме. В случае разрушения соединения сжатый воздух почти мгновенно расширяется (как при взрыве), что может привести к серьезным последствиям. Для удаления воздушных пузырей после заполнения жидкостью испытуемый узел рекомендуется обстучать снаружи резиновым молотком.

Гидравлические испытания производятся давлением, составляющим не менее 1,25 от рабочего давления. Визуальный контроль герметичности соединения выполняется обычно после снижения испытательного давления до рабочего. Методом опрессовки прове-

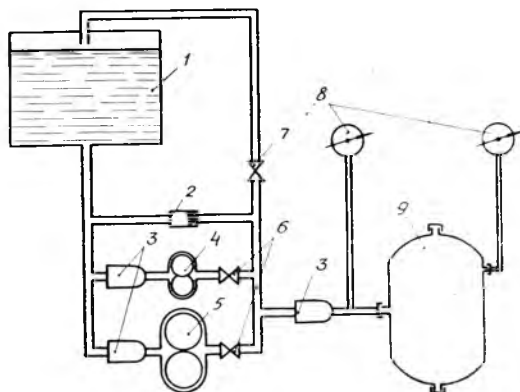


Рис. 5. Схема установки для гидравлических испытаний методом опрессовки:

1 — расходный бак; 2 — обратный клапан; 3 — фильтр; 4 — гидронасос высокого давления; 5 — гидронасос низкого давления; 6 — запорный вентиль; 7 — вентиль регулирования давления; 8 — манометр; 9 — испытываемый узел

ряется герметичность соединений топливных коллекторов, магистральных трубопроводов и других узлов.

Метод прокачки

При сборке узлов или систем двигателей, например, масляной системы ГТД, в ряде случаев не удается обеспечить замкнутого объема, чтобы провести испытания по методу опрессовки. В этом случае контроль герметичности соединений осуществляется методом прокачки. При этом методе необходимое испытательное давление создается за счет гидравлического сопротивления магистрали в местах установки форсунок, жиклеров и т. п. Схема установки для проведения гидравлических испытаний этим методом показана на рис. 6. Установка имеет два насоса, один из которых устанавливается на входе в проверяемую систему и создает необходимое испытательное давление. Второй насос служит для откачки жидкости из внутренней полости узла в расходный бак. В качестве проверочной жидкости чаще всего используются рабочие среды: керосин, масло и т. п. Для приближения условий испытания к условиям эксплуатации жидкость обычно подогревается до заданной температуры в расходном баке.

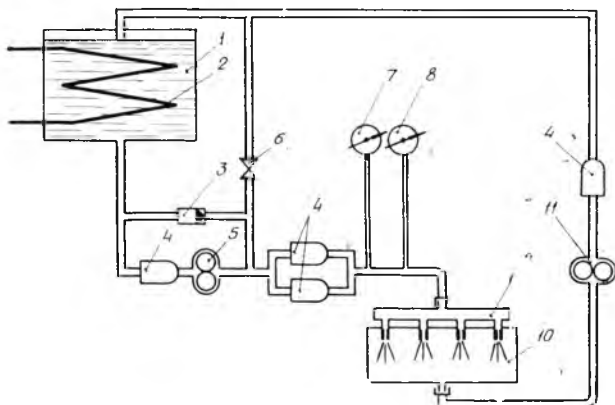


Рис. 6. Схема установки для гидравлических испытаний методом прокачки:

1 — расходный бак; 2 — нагревательный элемент; 3 — обратный клапан; 4 — фильтр; 5 — гидронасос; 6 — вентиль; 7 — термометр; 8 — манометр; 9 — испытываемая магистраль; 10 — изделие; 11 — насос откачки жидкости.

Капиллярный и люминесцентный методы

Как ранее отмечалось, течь может быть выражена в виде нарушения структуры материала, определяемого сквозным характером и малыми размерами дефекта. В связи с этим появляется возмож-

ность применить для обнаружения течей некоторые наиболее чувствительные методы структурной дефектоскопии, в частности, капиллярный и люминесцентный методы.

Контроль герметичности капиллярным методом производится следующим образом. Испытываемое соединение (доступное с обеих сторон) с одной стороны обильно смачивается жидкостью, например, керосином. Противоположная сторона покрывается проявителем — тонким слоем полужидкой меловой замазки. Просачивающийся сквозь течи керосин образует на белом фоне замазки хорошо заметные жирные пятна, которые фиксируются после испытания.

Люминесцентный метод отличается от предыдущего применением в качестве пробных веществ жидкостей, содержащих в себе люминесцирующие вещества, светящиеся под действием ультрафиолетового облучения. Осматривая изделие, например, в лучах ртутно-кварцевой лампы, можно обнаружить светящиеся точки и линии, индицирующие течи значительно меньшие, чем те, которые могут быть обнаружены обычным капиллярным методом.

Принципиальная основа капиллярного и люминесцентного методов заключается в способности жидкостей, смачивающих стенки капиллярного отверстия, подниматься по каналу капилляра. Предельная высота капиллярного подъема зависит от свойств жидкости и размеров канала и определяется формулой:

$$h = \frac{4\sigma \cos \Theta}{dg(\rho_{ж} - \rho_{г})}, \quad (2)$$

где d — диаметр капилляра, $см$;

g — ускорение силы тяжести, $см/сек^2$;

$\rho_{ж}$, $\rho_{г}$ — соответственно, плотности жидкости и газа, заполняющего капилляр, $г/см^3$;

σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, $дин/см$;

Θ — краевой угол, характеризующий смачиваемость стенок капилляра жидкостью (рис. 7).

При $\cos \Theta < 0$ (жидкость не смачивает стенок капилляра) высота подъема $h < 0$.

Большое влияние на высоту поднятия жидкости оказывает размер капилляра. В табл. 1 приведены значения h для раствора люминофора в трихлорэтилене по данным [3]. Эти значения показывают, что высота подъема жидкости даже в капиллярах достаточно больших диаметров весьма значительна и намного превышает размеры стенок деталей в реальных конструкциях двигателей.

Поскольку проверка ведется очень слабыми растворами (100—200 $мг/л$) в формулу (2) могут подставляться постоянные для трихлорэтилена: $\rho_{ж} = 1,466 г/см^3$; $\Theta = 0$; полная смачиваемость, $\sigma = 32,2 дин/см$; $g = 981 см/сек^2$.

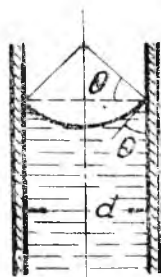


Рис. 7. Схема подъема жидкости под действием капиллярных сил.

Таблица 1

Диаметр отверстия, <i>мкм</i>	Максимально-возможная высота <i>h</i> подъема раствора за счет капиллярных сил, <i>см</i>	Длительность <i>t</i> появления сигнала в месте течи (при толщине стенки в <i>1 см</i>)	Поток газа, способный пройти через отверстие длиной <i>1 см</i> (в <i>л·мкм/сек</i>)
0,1	9·10 ³	3,5 года	2·10 ⁻⁸
0,3	3·10 ³	46 суток	3·10 ⁻⁷
1,0	900	31 ч	1,5·10 ⁻⁵
3,0	300	1,1 ч	6,5·10 ⁻⁴
10,0	90	2 мин	6·10 ⁻²
30,0	30	4 сек	45
100,0	9	0,1 сек	470

Люминесцентным методом испытывают большей частью малогабаритные изделия, погружаемые в люминесцирующий раствор. Длительность выдержки изделий в растворе определяется временем проникновения люминофора по каналу течи и может быть вычислена, исходя из формулы Пуайзейля:

$$t = \frac{128VL\eta}{\pi d^4 P}, \quad (3)$$

где *t* — время, необходимое для проникания раствора в количестве, обеспечивающем получение достаточно яркого сигнала;

V — объем проникающего раствора;

L — длина капилляра;

η — вязкость раствора;

P — разность давлений жидкости по обеим сторонам капилляра ($P = \rho h$).

Значения *t*, подсчитанные авторами [3] по формуле (3) приведены в столбце 3 табл. 1. Считая светящуюся точку заметкой при ее диаметре $D > 0,2$ мм, авторы принимают $V \geq 4 \cdot 10^{-6}$ см³ и находят приведенные в табл. 1 значения *t* для длины $L = 1$ см, вязкости трихлорэтилена $\eta = 8,8 \cdot 10^{-3}$ пз., его плотности $\rho = 1,466$ г/см³ и найденных ранее значений *h*. Высоту подъема и скорость проникновения жидкости по капиллярам можно повысить, прибавив к чисто капиллярным явлениям эффект откачки внутренних полостей погруженных в жидкость емкостей.

Таблица 1 наглядно показывает возможности и чувствительность люминесцентного метода. При выдержке изделия в растворе в течение нескольких минут можно обнаружить течи с диаметром канала 3—5 мкм. Часы выдержки позволяют повысить чувствительность в несколько раз. Течи с диаметром канала 0,3 мкм могут быть зарегистрированы после выдержки в течение 40—50 суток. Этот срок может показаться непомерно большим. Однако здесь нужно учесть, что сам процесс выдержки не требует дополнительного внимания и материальных затрат со стороны

производителей и в ряде случаев может оказаться целесообразным.

В ходе испытаний люминесцентным методом объекты погружают в люминесцирующий раствор так, чтобы он не попал на противоположную сторону проверяемого соединения, которое по окончании выдержки обследуется в ультрафиолетовых лучах. Применяемый люминофор должен иметь возможность исключить выявление ложных сигналов, например, жировых загрязнений и т. п. В этом случае более удобен люмоген оранжево-красный, дающий красное свечение, или люмоген светло-желтый с ярко-желтым свечением. Оба люминофора дают свечение, отличающееся от свечения всех примесей.

Помимо трихлорэтилена, в качестве растворителей могут применяться бензол и четыреххлористый углерод. Худшие результаты дает применение бутилацетата, ацетона, спирта.

КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ГАЗАМИ

К числу самых простых и распространенных методов контроля герметичности с применением газов относятся пневматические методы, то есть методы «аквариума», обмыливания и спада давления. Применение их наиболее эффективно в условиях испытания узлов, прочность которых допускает создание в них значительных избыточных давлений. При работе по этим методам в проверяемом узле создается избыточное давление газа в зависимости от прочности узла и требований к герметичности его соединений. Исходя из размеров, конфигурации поверхности испытываемого узла и других факторов производится погружение узла в жидкость либо смачивание поверхности мыльной эмульсией. Течи обнаруживают по образованию пузырьков газа, выходящих из негерметичных соединений. В ряде случаев течь обнаруживается по падению давления в замкнутом объеме.

Для изолированных от окружающей среды объемов применяется погружение емкости в ванну с горячей водой.

Однако возможности этих методов ограничены.

Требования современной техники привели к разработке новых методов контроля герметичности и созданию новейшей аппаратуры для обнаружения течей. К наиболее совершенным методам в настоящее время относятся методы течеискания с применением специальных приборов-течеискателей, работающих по различным схемам и обладающих различной чувствительностью.

Таким образом в практике авиадвигателестроения находят применение следующие методы контроля герметичности с помощью газов: метод «аквариума»; метод погружения узла в нагретую жидкость; метод обмыливания; метод замера спада давления; химический метод; метод галоидных течеискателей; метод масс-спектрометрических течеискателей; метод радиометрических течеискателей.

Ниже дается более подробное рассмотрение каждого из этих методов.

ВЕЛИЧИНА ТЕЧИ И РАЗМЕРНОСТЬ

Ранее указывалось, что величину течи очень трудно характеризовать ее расчетной проводимостью. Поэтому при контроле герметичности соединений газами течь часто характеризуют количеством воздуха, пропускаемым в единицу времени из объема в атмосферу и измеряемым в единицах потока газа Q в литрах за 1 сек. Этот поток приводится к определенному давлению, выражаемому обычно в миллиметрах ртутного столба.

Чаще всего применяются следующие единицы:

$$\frac{\text{л} \cdot \text{мм} \cdot \text{рт} \cdot \text{ст}}{\text{сек}}; \quad \frac{\text{л} \cdot \text{мм} \cdot \text{рт} \cdot \text{ст}}{\text{сек}}; \quad \frac{\text{см}^3 \cdot \text{ат}}{\text{сек}}; \quad \frac{\text{см}^3 \cdot \text{ат}}{\text{час}}; \quad \frac{\text{мм}^3 \cdot \text{ат}}{\text{час}};$$

$$1 \frac{\text{л} \cdot \text{мм} \cdot \text{рт} \cdot \text{ст}}{\text{сек}} = 1,32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{см}^3 \cdot \text{ат}}{\text{сек}} = 4,74 \frac{\text{см}^3 \cdot \text{ат}}{\text{час}}$$

Наиболее употребительной в технике единицей является $\frac{\text{л} \cdot \text{мм} \cdot \text{рт} \cdot \text{ст}}{\text{сек}}$

или сокращенно $\frac{\text{л} \cdot \text{мм} \cdot \text{рт} \cdot \text{ст}}{\text{сек}}$ (в иностранной литературе эта единица обозначается термином «lusek»). Так, например, $1 \frac{\text{л} \cdot \text{мм} \cdot \text{рт} \cdot \text{ст}}{\text{сек}} = 1000 \frac{\text{л} \cdot \text{мм} \cdot \text{рт} \cdot \text{ст}}{\text{сек}}$. Эта единица означает, что за одну секунду через канал течи протекает 1 литр газа, взятого при давлении 1 мм. рт. ст., или 1000 литров газа, взятого при давлении 1 мм. рт. ст.

Следует отметить, что величина потока газа еще не дает количественной оценки герметичности соединения, так как поток будет непостоянен с изменением величины избыточного давления в проверяемом узле и свойств контрольного газа. Течь, как реально существующая неплотность соединения, остается при этом постоянной. Отсюда возникает необходимость в стандартизации внешних условий при характеристике течи с помощью потока газа. Стандартным газом считается воздух. Стандартные условия принято задавать для вакуумных емкостей при внешнем давлении равном 1 ат. Тогда величину течи можно оценить потоком воздуха из атмосферы в объем, откаченный до давления пренебрежимо малого в сравнении с атмосферным. Этот поток, приведенный к стандартным условиям, будет обозначаться в дальнейшем индексом B , характеризующим величину течи.

В узлах или магистралях изделия, внутренние полости которых находятся под давлением выше атмосферного, утечки газа будут выражаться количеством газа Q , вытекающего из объема за единицу времени. Режим течения газа из области с повышенным давлением в атмосферу в течах обычной величины можно считать

близким к вязкостному. Уравнение, связывающее величину течи V с потоком газа через нее Q для истечения в атмосферу, имеет вид:

$$Q = B \frac{\eta_{\text{в}}}{\eta} \left(\frac{P^2}{P_{\text{ат}}^2} - 1 \right), \quad (4)$$

где $\eta_{\text{в}}$ — коэффициент вязкости воздуха;
 η — коэффициент вязкости контрольного газа;
 P — абсолютное давление внутри проверяемого узла;
 $P_{\text{ат}}$ — атмосферное давление.

Если принять, что контрольный газ — воздух и $P_{\text{ат}} = 1$, т.е.

$$Q = B(P^2 - 1);$$

или

$$B = \frac{Q}{P^2 - 1}. \quad (5)$$

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Метод «аквариума» (погружение объекта в жидкость)

При этом методе обнаружение течей производится по выделению пузырьков воздуха из испытываемого узла, предварительно заполненного газом до требуемого давления. Отсчет количества выделяющихся пузырьков производится визуально, а продолжительность образования пузырьков измеряется секундомером.

Рассмотрение законов образования пузырей позволяет определить связь потока Q газа через течь с размерами и частотой образования пузырей.

Вполне очевидно, что силы, приводящие к образованию пузырь-

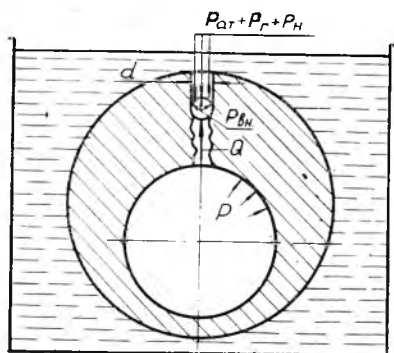


Рис. 8. Схема взаимодействия сил при образовании пузырька в канале течи.

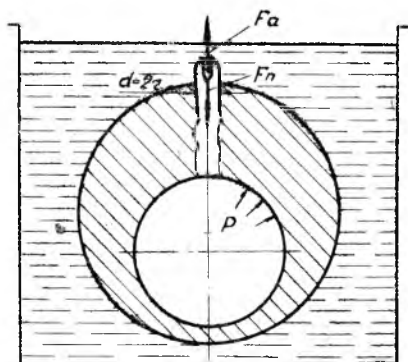


Рис. 9. Схема взаимодействия сил в момент отрыва пузырька воздуха с поверхности детали.

ка газа, должны преодолеть сопротивление всех сил, противодействующих этому образованию (рис. 8). Поэтому давление газа в пузырьке $P_{\text{вн}}$ должно быть, по крайней мере, равно суммарному давлению на пузырек извне. Это давление складывается из атмосферного давления $P_{\text{ат}}$, гидростатического давления столба жидкости $P_{\text{г}}$ и капиллярного давления $P_{\text{н}}$, обусловленного поверхностным натяжением окружающего пузырек слоя жидкости, то есть

$$P_{\text{вн}} = P_{\text{ат}} + P_{\text{г}} + P_{\text{н}}. \quad (6)$$

Величина слагаемых $P_{\text{г}}$ и $P_{\text{н}}$ определяется по следующим формулам

$$P_{\text{г}} = \rho gh;$$

$$P_{\text{н}} = \frac{4\sigma}{d};$$

где ρ — плотность жидкости;

g — ускорение силы тяжести;

h — высота столба жидкости;

σ — коэффициент поверхностного натяжения;

d — диаметр пузырька.

Внутреннее давление в пузырьке равно

$$P_{\text{вн}} = \frac{Q \cdot t}{V},$$

где Q — поток газа через течь, натекающий в объем пузырька;

t — время натекания;

V — объем пузырька.

Таким образом, равенство (6) приводит к выражению для потока:

$$Q = \frac{\pi d_0^3}{6t_0} \left(\frac{4\sigma}{d} + \rho gh + P_{\text{ат}} \right), \quad (7)$$

где нулевой индекс относит все величины к моменту отрыва пузырька, происходящего через время t_0 после начала его образования.

Оценивая слагаемые, взятые в скобки, можно заключить, что первый и второй члены суммы малы по сравнению с третьим, так что в реальных условиях испытаний поток газа через течь можно с достаточной точностью определить из уравнения

$$Q = \frac{\pi d_0^3}{6t_0} P_{\text{ат}} \quad (8)$$

или в более удобном для практики виде, поскольку

$$t_0 = \frac{\Delta t}{n},$$

$$Q = \frac{n \cdot \pi d_0^3}{6 \Delta t} P_{\text{ат}}, \quad (9)$$

то

где n — число пузырьков, образующихся за время наблюдения Δt .

Для того, чтобы определить чувствительность рассматриваемого метода к течам, необходимо задаться предельно малыми размерами пузырьков, поддающихся регистрации, и частотой их появления. В связи с этим необходимо рассмотреть закономерности, определяющие размеры образующихся пузырьков газа. Образование пузырьков газа на выходе капиллярного канала течи сопровождается искривлением ограничивающего его поверхностного слоя жидкости (рис. 9). Поверхностное натяжение этого слоя определяет силу F_n , удерживающую пузырек у поверхности, причем

$$F_n = 2\pi r\sigma, \quad (10)$$

где r — радиус капиллярного канала течи у выхода на поверхность.

Коэффициент σ определяет силу, действующую на единицу длины линии соприкосновения пузырька с твердой поверхностью. Величина σ зависит от химического состава жидкости и от наличия в ней примесей. Значения коэффициентов σ ряда чистых жидкостей приведены в таблице 2 [5].

Силе поверхностного натяжения противодействует архимедова сила F_a , стремящаяся вытолкнуть образовавшийся пузырек. Если пренебречь плотностью газа по сравнению с плотностью жидкости, то эта сила равна

$$F_a = \frac{\pi d_0^3}{6} g\rho, \quad (11)$$

Исходя из равенства обеих названных сил в момент отрыва пузырька, можно вывести уравнение для его диаметра в этот момент

$$d_0 = \sqrt[3]{12 \frac{r\sigma}{g\rho}}. \quad (12)$$

Приведенное уравнение показывает, что размеры образующихся пузырьков зависят (причем, весьма слабо) от параметров жидкости σ и ρ и радиуса r капилляра течи у поверхности. Прочие параметры течи на величине d_0 не сказываются.

Рассматривая обычный случай погружения испытуемого объекта в воду (значение σ и ρ берем из таблицы 2), находим, что при диаметре капилляра порядка 10 мкм (такой капилляр при длине канала 10 мм образует течь порядка $10^{-2} \frac{\text{л} \cdot \text{мкм}}{\text{сек}}$) можно ожидать появление пузырьков диаметром около 0,5 мм. Если считать такие пузырьки предельно малыми, поддающимися наблюдению,

Таблица 2

Жидкость	Значение коэффициентов при $t=20^\circ\text{C}$	
	σ дин/см	ρ г/см ³
Бензол	29	0,879
Спирт	22	0,789
Вода	73,1	1,0
Керосин	24	0,82
Ртуть	546	13,5

и принять возможную для регистрации частоту появления — 1 пузырьек за 30 сек, то минимально регистрируемый поток в соответствии с уравнением (8) можно оценить величиной

$$Q_{\min} = 1,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{л} \cdot \text{мм} \cdot \text{мм}}{\text{сек}} = 2,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{см}^3 \text{ ат}}{\text{сек}}$$

Поток Q будет проходить через тем меньшую течь, чем больше давление испытания. Следовательно, наименьшая регистрируемая течь зависит от давления P в испытываемом объеме и при вязкотном режиме истечения определяется уравнением

$$B_{\min} = \frac{\eta}{\eta_0} \cdot \frac{Q_{\min}}{\frac{P^2}{P_{\text{ат}}^2} - 1} \quad (13)$$

В случае испытания объекта воздухом при различных давлениях и принятом $Q_{\min} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ л} \cdot \text{мм} / \text{сек}$ чувствительность метода будет характеризоваться приведенными цифрами [5], если только изменение величины течи не сопровождается изменением радиуса канала на выходе.

$P, \text{ ат}$	1,01	1,01	2	3	10
$B_{\min}, \frac{\text{л} \cdot \text{мм} \cdot \text{мм}}{\text{сек}}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$

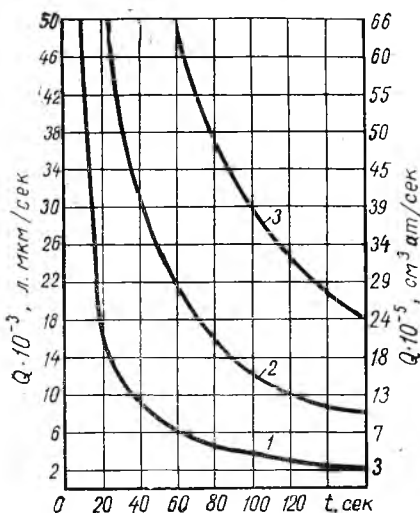


Рис. 10. График зависимости величины потока газа от времени образования пузырьков:

1 — $d_{\text{пуз}} = 1 \text{ мм}$; 2 — $d_{\text{пуз}} = 1,5 \text{ мм}$;
3 — $d_{\text{пуз}} = 2 \text{ мм}$.

Вполне очевидно, что если проводить сравнение чувствительности данного метода при различных давлениях испытания, то коэффициент изменения чувствительности K_r может быть определен из соотношения

$$K_r = \frac{P_1^2 - 1}{P_2^2 - 1} \quad (14)$$

При увеличении диаметра капилляра течи диаметры образуемых пузырьков также будут увеличиваться и, следовательно, минимально регистрируемый поток газа через течь при той же частоте появления пузырьков будет иным. График зависимости величины потока газа (Q) от времени образования пузырьков $\varnothing 1, 1,5$ и 2 мм показан на рис. 10.

Условия испытаний существенно меняются при вакуумировании пространства над жидкостью.

Как показывают расчеты, при вакуумировании пространства выигрыш в чувствительности может достигать 20 раз.

При проверке герметичности узлов типа клапанов, редукторов, когда не допускается их погружение в жидкость, испытание осуществляется способом «мундштука», при котором к выходному штуцеру узла подсоединяется резиновый шланг* (трубка), а другой конец погружается в жидкость рядом стоящей ванны на глубину до 3 мм. Величина течи определяется по количеству выделяющихся пузырьков за определенное время. Диаметр резинового шланга обычно составляет 4—6 мм.

Метод «аквариума» целесообразно применять при испытании узлов, внешние поверхности которых не имеют глубоких, плохо просматриваемых впадин, а объем не более 150 литров. При испытаниях этим методом следует иметь в виду, что узлы большого объема, обладают значительной плавучестью и для их погружения в воду требуются специальные устройства. Эти устройства не должны мешать осмотру мест негерметичности и в то же время позволять поворачивать узел. При работе необходимо очень строго соблюдать правила техники безопасности, так как узел, заполненный воздухом или газом, под давлением представляет большую взрывоопасность. Проверке могут подвергаться узлы, прочность которых подтверждена гидроиспытаниями.

Давление пневмоиспытания должно быть обязательно ниже давления гидроиспытания. Однако даже при этих условиях возможны непредвиденные разрушения. Поэтому испытания проводят в ваннах, имеющих специальную защиту, с наблюдением через броневые стекла. В наиболее опасных случаях испытания проводятся в бронекабинах с дистанционным наблюдением.

Для уменьшения объема воздуха внутреннюю полость узла (например, трубопровода) иногда заполняют пластмассовыми шариками.

При подводе воздуха необходимого давления в испытываемый узел применяют специальные пневмостенды или воздушнораспределительные щитки, включающие в себя комплект запорных вентилей, редукторов, манометров и другую арматуру.

Упрощенная схема пневмостенда показана на рис. 11.

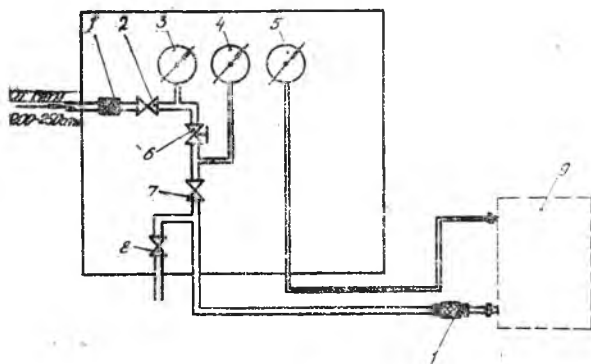


Рис. 11. Схема пневмостенда для подвода воздуха в изделие:

- 1 — фильтр; 2 — входной вентиль; 3, 4, 5 — манометры замера давления; 6 — редуктор газовый; 7 — запорный вентиль; 8 — дренажный вентиль; 9 — испытываемый узел.

Метод погружения испытываемого узла в нагретую жидкость

Процесс проверки по этому методу представляет собой разновидность метода «аквариума» и применяется, в основном, для испытания узлов, имеющих замкнутые объемы и содержащие газ под атмосферным давлением (поплавки, гильзы anerоидные).

В замкнутом объеме давление уже не может быть повышено подачей газа извне. Поэтому одним из возможных путей повышения давления является повышение температуры газа внутри замкнутого объема. С этой целью испытуемый узел погружают в нагретую жидкость. Теплоемкость жидкости и ее количество при этом должны быть достаточно велики для того, чтобы погружение холодного объекта не вызывало искажений в температурном режиме жидкости, а узел принял температуру окружающей среды.

В качестве рабочей жидкости применяется вода или силиконовое масло.

Изменение давления в замкнутом объеме, вызванное изменением его температуры, определяется уравнением

$$\frac{P_2 - P_1}{P_1} = \frac{T_2 - T_1}{T_1} \quad (15)$$

или

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1},$$

где P_1 — исходное давление в объеме (в большинстве случаев равно атмосферному);

T_1 — исходная абсолютная температура газа в объеме (берется равной температуре помещения цеха);

P_2 и T_2 — значения тех же параметров после нагревания.

Под влиянием избыточного давления ($P_2 - P_1$) происходит истечение газа из течи, обнаруживаемое по образованию пузырьков. Чем выше рабочая температура, тем больше чувствительность испытаний. Ограничением здесь служит поведение жидкости. Поэтому выбор рабочей жидкости определяется, в основном температурой ее кипения. Вода может быть нагрета без образования пузырей до температуры 80°C , так что избыточное давление в погруженном в нее узле составит $0,2 \text{ ат}$. Чувствительность испытаний при этом методе, согласно данным, приведенным в табл. 3, обеспечит обнаружение течи $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ л. мкм/сек}$.

При использовании в качестве рабочей жидкости силиконового масла можно достигнуть температуры внутри узла 200°C , что приведет к повышению давления до $1,68 \text{ ат}$ и позволит обнаружить течь $4 \cdot 10^{-3} \text{ л. мкм/сек}$.

Метод обмыливания проверяемых соединений

Сущность метода сводится к тому, что на поверхность деталей, образующих соединение, наносится мыльная эмульсия, а во внутреннюю полость узла подается избыточное давление воздуха.

В местах течи образуются пузырьки мыльной эмульсии, что указывает на негерметичность соединения.

Отличие в закономерности образования пузырей на мыльной пленке по сравнению со случаем погружения в жидкость определяется, во первых, отсутствием в уравнении (6) гидростатического давления и, во вторых, повышенным капиллярным давлением $P_{\text{н}}$. Это давление для пузырей в газовой среде, окруженных двухсторонней пленкой, равно

$$P_{\text{н}} = \frac{8\sigma}{D}. \quad (16)$$

Так как и здесь $P_{\text{н}} \ll P_{\text{ат}}$, то поток газа можно определять по ранее приведенному уравнению (8).

Проводя испытания данным методом, следует иметь в виду, что устойчивость мыльных пузырей обеспечивается увеличением вязкости жидкости, а не коэффициентом поверхностного натяжения. Вязкая жидкость медленно стекает под действием своего веса, и утонение пленки происходит не так быстро. И наоборот, чем меньше поверхностное натяжение, тем меньше та сила, которая стремится разорвать пленку и тем устойчивее пузыри. Чистая вода — жидкость, с большим коэффициентом поверхностного натяжения σ и малой вязкостью η . Пена на ней не образуется. Растворение в воде мыла уменьшает σ и увеличивает η . Образованию пузырей способствует растворение в воде яичного белка, желатина и других веществ. Для увеличения вязкости мыльного раствора к нему можно добавлять глицерин. Мыльная эмульсия готовится по особому рецепту, обеспечивающему ее химическую нейтральность.

Метод обмыливания применяется при проверке герметичности соединений тех узлов, которые нельзя погружать в жидкость. Иногда этот метод используют в качестве предварительного испытания перед проверкой герметичности более высокочувствительным методом (например, галоидных и масс-спектрометрических теческательей).

Оборудование, применяемое для подвода воздуха в узел, и мероприятия, обеспечивающие технику безопасности при работе, такие же, как и при методе «аквариума».

Метод замера спада давления

При этом методе негерметичность в соединении деталей определяется по падению давления во внутренней полости узла, изолированной от сети. Для этого во внутренней полости проверяемого узла создается необходимое избыточное давление, сеть перекрывается и производится замер давления в начале и конце установленного промежутка времени. Уменьшение первоначальной величины давления свидетельствует о негерметичности соединения. Место течи при этом не определяется.

Необходимо отметить, что нельзя дать количественную оценку негерметичности только по скорости изменения давления, так как равные количества газа, вытекающего из сосудов различного объема, вызовут различное падение давления. Поэтому течь должна характеризоваться количеством газа, вытекающего из емкости в единицу времени Δt , т. е. произведением объема V , занимаемого газом, на изменение в нем давления ΔP в единицу времени, после прекращения поступления воздуха в узел, то есть

$$Q = \frac{V \cdot \Delta P}{\Delta t} \quad (17)$$

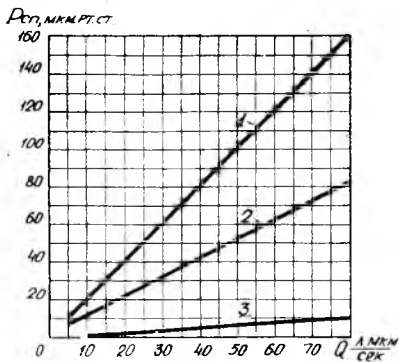


Рис. 12. График зависимости величины спада давления от истечения газа за 1 сек при разных объемах узлов

1 — $V=0.5$ л; 2 — $V=1$ л; 3 — $V=10$ л.

Этот метод рекомендуется применять при испытании узлов, объем которых не превышает 0,5 л, так как с увеличением объема узлов значительно повышается продолжительность испытания. График зависимости величины спада давления от истечения газа за 1 сек при разных объемах испытываемых узлов приведен на рис. 12.

При заполнении внутренней полости узлов газом до давления 20 ат и более может происходить разогрев газа, что приведет к погрешностям в замере давления. Поэтому перед началом замера спада давления необходимо предусматривать выдержку в течение нескольких минут для охлаждения газа.

Схема стенда для создания давления в проверяемом узле соответствует рис. 11. Следует заметить, что запорная арматура, технологическая оснастка и их соединения, применяемые при испытании данным методом, должны быть герметичны.

ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Химические методы контроля герметичности основаны на химическом взаимодействии контрольного газа, проходящего через течь, с индикаторным веществом, наносимым на поверхность изделия. В качестве контрольного газа может использоваться аммиак. В этом случае перед проведением испытания на поверхность соединяемых деталей узла или изделия наносится чувствительная к аммиаку индикаторная масса, а во внутреннюю полость подается под давлением воздушно-аммиачная смесь. При воздействии аммиака индикаторная масса изменяет свой цвет. В местах течей

образуются пятна малинового цвета, хорошо выделяющиеся на основном фоне покрытия.

Применение данного метода целесообразно при необходимости контроля герметичности по всей поверхности узла. Поверхности объектов, испытываемых по данному методу, должны быть сухими, чистыми и нейтральными, то есть не должны вне воздействия аммиака изменять цвет нанесенной на них индикаторной массы. Требуемая чистота поверхности достигается последовательной обработкой ее жидкостями определенного химсостава. Метод с использованием аммиака нельзя применять в том случае, когда в процессе испытания узла имеется возможность взаимодействия аммиака с деталями узла, изготовленными из материалов с применением таких металлов, как кадмий, цинк, медь, никель, серебро.

Содержание аммиака в смеси должно быть не менее 0,5% и не более 1%. Если смесь содержит от 15,5 до 27% аммиака, то при воздействии огня или детонатора может произойти взрыв. Нанесение индикаторной массы производится при помощи распылителя или кисти. Поверхность очищается от индикаторной массы струей сжатого воздуха давлением до 10 атм из шланга или салфеткой, смоченной в теплой воде.

Разновидностью этого метода можно считать способ, когда узел, заполненный воздушно-аммиачной смесью, погружается в индикаторную жидкость, например, фенолфталеин. Течь обнаруживается по изменению окраски вследствие происходящей химической реакции.

Методы течеискания

Непрерывное совершенствование техники потребовало разработки более точных методов обнаружения течей и создания чувствительной аппаратуры. К числу их относятся методы течеискания.

Общая характеристика различных современных течеискателей заключается в их способности избирательно реагировать на то или иное вещество, носящее название пробного вещества. Процесс поиска течи заключается в улавливании течеискателем пробного вещества (газа), проникающего через течь, и его реакции на это вещество. Чем выше избирательная способность прибора, тем резче его реакция на пробное вещество, тем больше оказывается чувствительность течеискателя. В свою очередь, реакция прибора на проникание сквозь течь пробного вещества тем резче, чем сильнее это вещество отличается от воздуха по электрическим, тепловым или другим свойствам.

Существуют течеискатели, реагирующие только на пробное вещество вне зависимости от присутствия воздуха, посторонних паров и газов — это наиболее совершенные приборы. К ним относятся масс-спектрометрические и радиоактивные течеискатели.

Существуют течеискатели, практически не реагирующие на присутствие воздуха и ряда других газов, но индицирующие появ-

ление целой группы веществ. К ним относится галоидный теченскатель. В качестве пробного вещества при работе с ним чаще всего выбирается газ фреон-12 или фреон-22.

Методы работы с теченскателями каждого типа весьма разнообразны и их следует рассмотреть более подробно.

Метод галоидных теченскателей

Галоидный теченскатель может быть использован для определения мест течи в любых изделиях, позволяющих создать избыточное давление галоидосодержащего газа внутри изделий.

Принцип работы галоидного теченскателя состоит в следующем. Платина, накаливаемая до температуры 800—900°C, дает заметную эмиссию положительных ионов, которая резко возрастает

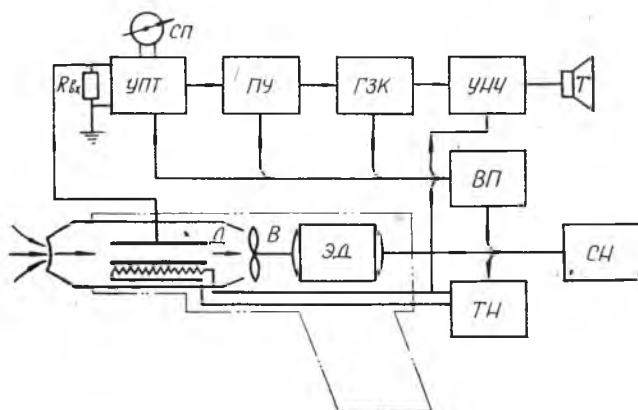


Рис. 13. Блок-схема галоидного теченскателя ГТИ-3:

Д — датчик; *В* — вентилятор; *ЭД* — электродвигатель; *СН* — стабилизатор напряжения; *ТН* — трансформатор накала; *ВП* — выпрямитель; *УПТ* — усилитель постоянного тока; *СП* — стрелочный прибор; *ПУ* — предварительный усилитель; *ГЗК* — генератор звуковых колебаний; *УНЧ* — усилитель низкой частоты; *Т* — телефон

в присутствии в атмосфере воздуха газов, содержащих галоиды. Это дает возможность обнаруживать небольшие утечки галоидосодержащего газа, создающие местное повышение концентрации галоидов.

Галоидный теченскатель ГТИ-2 или ГТИ-3 (рис. 13) представляет собой дюнд с платиновыми электродами, один из которых нагревается до $t=700-900^{\circ}$. Накаленный платиновый электрод (анод) эмитирует положительные ионы, которые могут регистрироваться при атмосферном давлении. Вентиляционное устройство непрерывно протягивает воздух через межэлектродное пространство. Попадание в это пространство газов, содержащих галоиды (фреон, четырехлористый водород и др.), резко увеличивает ион-

ный ток между электродами. Ионный ток усиливается с помощью усилителя постоянного тока и регистрируется стрелочным прибором. Параллельно сигнал проходит через предварительный усилитель, генератор звуковых колебаний, усилитель низкой частоты и подается на телефон (или динамик). Увеличение частоты сигналов в телефоне свидетельствует о течи в испытуемом объекте. Относительная величина течи может быть грубо оценена по показаниям стрелочного прибора.

Контроль герметичности узлов галоидными течеискателями проводится с применением пробного газа (фреона-12 или фреона-22) как в чистом виде, так и в смеси с воздухом, при этом содержание фреона в смеси должно быть не менее 10%.

Избыточное давление фреона в смеси определяется по формуле

$$P_r = \frac{C}{100}(P + 1) \text{ ат.},$$

где P — испытательное давление по Т. У.;

C — принятое процентное содержание галоидосодержащего газа в смеси.

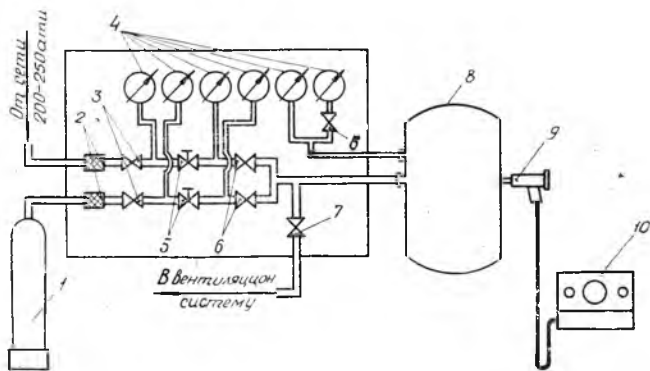


Рис. 14. Схема контроля герметичности с помощью галоидного течеискателя:

- 1 — баллон с газом «Фреон»; 2 — фильтр; 3 — входной вентиль; 4 — манометры замера давления; 5 — редуктор; 6 — вентиль запорный; 7 — вентиль дренажный; 8 — испытываемый узел; 9 — щуп течеискателя; 10 — галоидный течеискатель.

При заполнении внутренней полости узла фреоном избыточное давление его при соответствующей температуре должно быть на 0,5 ат ниже давления насыщенных паров (например при 20°C давление насыщенных паров для фреона-12 составляет 5,78 ат., а для фреона-22 — 9,35 ат.).

Если смешение фреона с воздухом осуществляется внутри узла, то вначале испытываемый узел заполняется фреоном до давления P_r , после чего производится подача воздуха до давления P .

Возможно так же заполнение испытываемого узла заранее приготовленной смесью. Схема контроля герметичности с помощью галоидного течеискателя показана на рис. 14.

При проверке герметичности для наибольшего улавливания галогидосодержащих газов, вытекающих через течи, щуп течеискателя необходимо перемещать в непосредственной близости от поверхности деталей, образующих соединение (зазор 1—2 мм), а срез сопла должен быть по возможности параллелен проверяемой поверхности. Скорость перемещения щупа не более 8 мм/сек.

Чувствительность галоидного течеискателя определяется величиной минимальной утечки чистого фреона, которую прибор уверенно отмечает. Например, с помощью течеискателя ГТИ-3 определяются утечки фреона (Ф-12), составляющие 0,5 г в год. Такая утечка вызывает отклонение стрелки измерительного прибора не менее чем в 30 делений на самой чувствительной шкале. Таким образом, минимальная течь, которая может быть обнаружена при испытании чистым фреоном при давлении 5 атм., составляет $1 \cdot 10^{-5}$ л. мкм/сек.

При использовании смеси фреона с воздухом чувствительность испытаний при тех же давлениях, что и чистым фреоном, уменьшается с понижением концентрации фреона в смеси. Однако, в этом случае можно увеличить чувствительность испытаний повышением общего давления смеси. С изменением давления P и концентрации галогидосодержащего газа в изделии чувствительность испытаний меняется пропорционально концентрации и множителю (P^2-1) . Таким образом, путем изменения концентрации галогидов и давления внутри испытываемого узла можно достигнуть желаемой чувствительности при испытаниях.

Галоидные течеискатели ГТИ-2 и ГТИ-3 нашли широкое распространение в машиностроении. Этому методу отдается предпочтение при проверке герметичности больших объемов или систем с сильно разветвленными трубопроводами.

Применяемый газ-фреон — относительно дешев, безвреден и взрывобезопасен.

Масс-спектрометрический метод

Этот метод является наиболее универсальным и обладает высокой чувствительностью.

Масс-спектрометрия представляет собой метод разделения по массам сложной смеси газов или паров с помощью электрических и магнитных полей.

Масс-спектрометрический течеискатель — это относительно простой газоанализатор, настроенный, как правило, на регистрацию содержания одного пробного газа в газовой смеси. В большинстве случаев пробным газом служит гелий.

Масс-спектрометрический анализ сводится к следующим процессам, проходящим в условиях высокого вакуума:

превращение анализируемых молекул в положительные ионы с зарядом e ;

создание моноэнергетического ионного пучка посредством ускорения ионов продольным электрическим полем;

разложение ионного пучка на компоненты по значениям m/e , где m — масса заряженной частицы;

регистрация и изменение интенсивности выделенного пучка с определенным отношением m/e .

Все указанные процессы осуществляются в трех основных узлах масс-спектрометра: ионном источнике, анализаторе и регистрирующем устройстве. В ионном источнике происходит ионизация газа и формирование ионного пучка, который в анализаторе разделяется по массам. Выделенный пучок ионов с определенным значением m/e воспринимается регистрирующим устройством, измеряющим его интенсивность. Таким образом, оказывается возможным в объеме, связанном с масс-спектрометрической камерой, индцировать содержание некоторого газа, выбранного в качестве пробного, вне зависимости от присутствия других газов.

Основным элементом, определяющим тип и возможности масс-спектрометра, служит его ионо-оптическая система — анализатор. Ионный источник и регистрирующее устройство большей частью аналогичны у всех масс-спектрометров, применяемых для газового анализа и отыскания течей.

По типу анализатора все масс-спектрометры могут быть разделены на статические, где все процессы происходят в постоянных электрических и магнитных полях, и динамические, где в разделении масс принимают участие переменные электрические поля.

Наша промышленность выпускает масс-спектрометрические гелиевые теческатели типа ПТИ-6, ПТИ-7 со 180-градусной фокусировкой, относящиеся к типу статических. Эти теческатели обладают собственной вакуумной системой и дают возможность производить разнохарактерные испытания на герметичность.

Принципиальная схема масс-спектрометрического анализа заключается в следующем: в ионном источнике масс-спектрометра (рис. 15) газы, поступающие из испытываемого объекта (в том числе и пробный) ионизируются. Образовавшиеся ионы вытягиваются из камеры через выходную щель S_1 , фокусируются в пучок и ускоряются в область анализатора. В приборах со 180° фокусировкой анализ газов, подвергшихся ионизации, производится путем разделения ионов по массам в постоянном магнитном поле

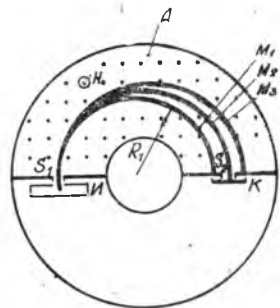


Рис. 15. Схема масс-спектрометрического анализа:

И — ионный источник;
 S_1 — выходная щель; S_2 — входная щель; А — анализатор; К — коллектор.

(на рис. 15 магнитные силовые линии изображены точками, указывающими, что направление их перпендикулярно плоскости чертежа снизу вверх). При движении ионов в однородном поперечном магнитном поле анализатора, свободном от электрических полей, под действием лоренцевой силы ионы будут перемещаться по окружностям, радиус которых равен

$$R = \frac{m \cdot V}{e \cdot H} \text{ см}, \quad (19)$$

где m — масса движущихся частиц;
 e — заряд частицы;
 V — скорость движения частиц;
 H — напряженность магнитного поля.

Так как газы имеют различные массы, происходит разделение ионного пучка сложного состава на ряд пучков с фиксированным отношением m/e . Поставив на пути одного из них входную щель S_2 (рис. 15) и коллектор ионов K , можно измерить интенсивность пучка, служащую мерой концентрации определенных частиц в смеси газов.

Зависимость (19) может быть приведена к более удобному виду

$$R = \frac{144}{H} \sqrt{MV}, \quad (20)$$

где M — эффективная масса, равная отношению массового числа частицы к числу ее элементарных зарядов (так, например, однократно заряженный ион молекулярного кислорода с молекулярным весом 32 обладает эффективной массой $M = \frac{32}{1} = 32$);

V — ускоряющее напряжение, в.

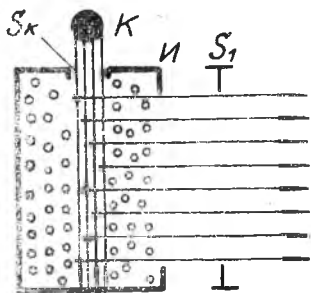


Рис. 16. Принцип действия ионного источника.

K — катод; S_K — входная щель для электронов; $И$ — камера ионизатора; S_1 — диафрагма.

В этой формуле абсолютные значения единичной массы и единичного заряда вынесены в константу.

Однократная ионизация — процесс преобладающий. Поэтому, когда речь идет о рассмотрении масс-спектров, говорят лишь о разделении частиц по массам, но не по зарядам.

В качестве ионного источника в современных масс-спектрометрических приборах наибольшее применение получил источник с накаливаемым катодом. В нем накаленный вольфрамовый катод K (рис. 16) излучает электроны, которые фокусируются магнитным полем и ускоряются электрическим полем, приложенным между катодом и камерой ионизатора $И$. В камеру поступает

газ, подлежащий анализу. Сталкиваясь с молекулами этого газа, электроны ионизируют их. Образовавшиеся ионы вытягиваются из камеры, фокусируются в пучок и ускоряются через диафрагму S_1 в полость анализатора.

Регистрирующее устройство масс-спектрометрических приборов состоит из коллектора, который воспринимает пучок ионов пробного газа. Слабые ионные токи в дальнейшем усиливаются с помощью усилителей постоянного или переменного тока и измеряются выходным прибором. Электрическая блок-схема масс-спектрометра показана на рис. 17.

В качестве пробного газа в масс-спектрометрических течейскателях обычно выбирается гелий, обладающий рядом достоинств. Использование гелия позволяет создать высокочувствительный прибор сравнительно простой конструкции. Большая чувствительность течейскателя получается вследствие малого содержания гелия в атмосфере ($5 \cdot 10^{-4}\%$) и среди газов, выделяемых стенками аппаратуры. В результате этого подлежащий регистрации сигнал появляется на малом фоне (фон-показания, определяемые наличием гелия в остаточных газах). Малый атомный вес гелия способствует уменьшению размеров камеры анализатора. Эти преимуще-

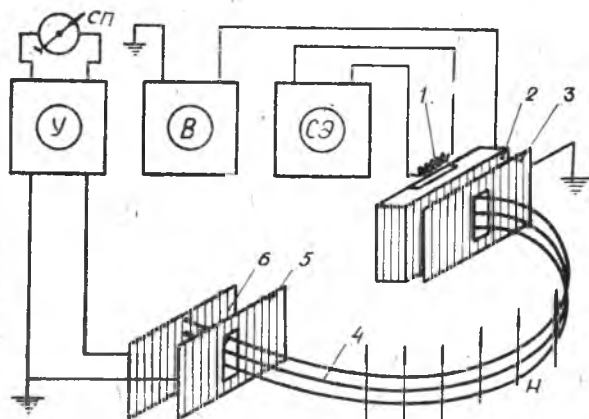


Рис. 17. Электрическая блок-схема масс-спектрометра

1 — катод; 2 — корпус ионизатора; 3 — диафрагма с выходной щелью; 4 — ионный луч; 5 — входная диафрагма; 6 — коллектор; С.Э. — стабилизатор эмиссии; В — выпрямитель (обеспечивающий разгоняющее напряжение); У — усилитель ионного тока с выходным прибором.

ства гелия удачно сочетаются с его химической инертностью, делающей применение его совершенно безвредным и безопасным в работе.

Проверка герметичности соединений масс-спектрометрическим методом с помощью приборов типа ПТИ может быть осуществлена несколькими способами. Основными из них являются способ вакуумирования и способ шупа.

При проверке герметичности способом вакуумирования (обдува) течейскатель своей вакуумной частью подсоединяется к испытываемому узлу, создавая разрежение. Внешняя поверхность

узла обдувается тонкой струей гелия. Способ выявляет герметичность в целом и не указывает место течи (недостаток). Схема проверки герметичности по этому способу показана на рис. 18. Контроль герметичности по способу обдува гелием применяется

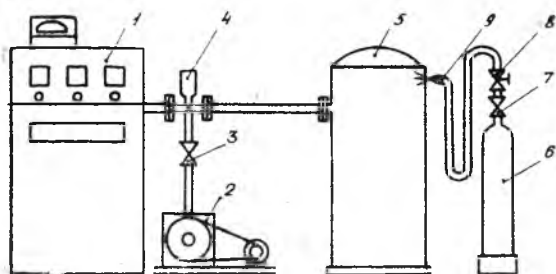


Рис. 18. Схема контроля герметичности масс-спектрометрическим методом по способу обдува:

1 — течеискатель типа ПТИ с выносным прибором; 2 — механический вакуумный насос; 3 — вентиль; 4 — манометр; 5 — испытываемый узел; 6 — баллон с гелием; 7 — вентиль; 8 — редуктор; 9 — шланг обдува

обычно для объектов, не работающих под избыточным давлением, но требующих высокой плотности в соединениях и по основному металлу. При этом способе контроля удается обнаружить течи порядка $1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{л. мкм}}{\text{сек}}$.

При проверке герметичности способом щупа испытываемый узел заполняется гелием или воздушно-гелиевой смесью до давления, указанного в Т. У., после чего соединения обследуются щупом. При наличии негерметичности соединения гелий, находящийся под избыточным давлением, проникает через течи и засасывается в камеру масс-спектрометрического течеискателя. По отклонению стрелки измерительного прибора и изменению звукового сигнала судят о наличии течи. Схема проверки герметичности способом щупа показана на рис. 19 (конструкция пневмостенда для подвода гелия и воздуха аналогична изображенной схеме (рис. 14).

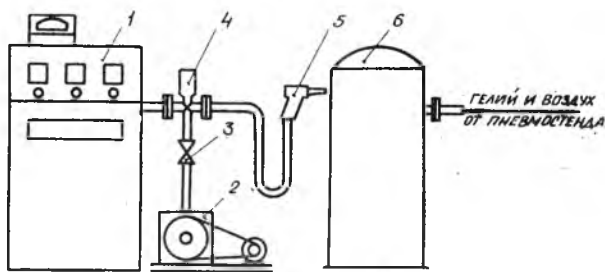


Рис. 19. Схема контроля герметичности масс-спектрометрическим методом по способу щупа:

1 — течеискатель типа ПТИ с выносным прибором; 2 — механический вакуумный насос; 3 — вентиль; 4 — манометр; 5 — щуп течеискателя; 6 — испытываемый узел.

В случае заполнения внутренней полости узла воздушногелиевой смесью расчет парциального избыточного давления гелия (P_r) производится по формуле (18).

При обследовании мест негерметичности скорость перемещения щупа не должна превышать 5 мм/сек . Проверку следует начинать с нижних участков испытываемого узла с постепенным переходом

к верхним. При этом способе контроля удастся обнаруживать течи порядка $1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{л. МКМ}}{\text{сек}}$ и выше.

Радиоактивный метод

Поиск течей данным методом наиболее эффективен при испытании на герметичность малых замкнутых объемов. Он позволяет обнаруживать в них течи вплоть до $1 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-9} \frac{\text{л. МКМ}}{\text{сек}}$.

Сущность этого метода состоит в том, что испытываемый узел или изделие в течение некоторого времени выдерживают в контейнере, где создается избыточное давление радиоактивного газа. Затем радиоактивный газ удаляют, наружные поверхности узла тщательно очищают от радиоактивных загрязнений сильной воздушной струей. В результате излучающими продолжают оставаться лишь те узлы, во внутреннюю полость которых проник через течи радиоактивный газ. Величина течи будет определяться излучательной способностью проверяемого узла (с учетом времени выдержки и давления при испытании). Поэтому, если поместить проверяемый узел перед детектором радиации, то можно не только установить факт негерметичности, но и определить величину течи.

При проверке герметичности данным методом более целесообразно применять γ -активный газ, так как γ -радиация способна проникать сквозь толщу материалов при сравнительно малом поглощении и поэтому проще установить зависимость между излучением и количеством прошедшего через течь газа.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТЕЧЕЙСКАТЕЛЕИ И ПРОВЕРКА ИХ РАБОТЫ

Основной характеристикой, определяющей возможность применения течеискателя для контроля герметичности соединений, является его чувствительность. Часто чувствительность течеискателя рассматривают в статическом режиме, который в отличие от динамического характеризует возможности самого течеискателя без учета условий проведения испытания.

Динамическая чувствительность или реальная чувствительность испытаний может существенно отличаться от статической чувствительности вследствие изменения перепада давления и режима течения газа во времени.

Поскольку существующие течеискатели (галоидный, масс-спектрометрический) обнаруживают течь в соединениях путем индицирования пробного вещества, проникающего через течи, то естественной характеристикой таких течеискателей служит их способность зарегистрировать некоторый наименьший поток пробного вещества $Q_{\text{мин}}$.

В процессе работы для определения величин обнаруживаемых

течей удобней пользоваться другой характеристикой статической чувствительности, такой как поток пробного газа, приходящегося на 1 деление шкалы выходного прибора. Таким образом, статическая чувствительность по потоку при постоянной скорости откачки анализатора может быть определена потоком пробного вещества, вызывающим отсчет в одно деление

$$S_Q = \frac{Q}{\alpha} \frac{\text{л} \cdot \text{МКМ}}{\text{сек}} / \text{деление},$$

где Q — поток пробного газа;
 α — вызываемый им отсчет.

Минимально-регистрируемый поток может быть определен, исходя из значений статической чувствительности по достоверному отсчету на фоне имеющихся шумов. Достоверным принято считать отсчет, вдвое превышающий все случайные отклонения стрелки выходного прибора вследствие нестабильности работы и других факторов. Таким образом, наименьший уверенно регистрируемый теческателем поток $Q_{\text{мин}}$ пробного газа будет равен:

$$Q_{\text{мин}} = S_Q \cdot \alpha_{\text{мин}},$$

где $\alpha_{\text{мин}}$ — минимальный отсчет, могущий считаться достоверным.

При подготовке теческателя к работе по контролю герметичности каждый раз должна проводиться проверка его чувствительности путем градуировки. Для этого щуп теческателя подносится к наконечнику калиброванной течи, дающей измеренное истечение Q пробного газа. Калиброванная течь (эталон течи) представляет собой металлический баллончик с укрепленной на нем течью. В баллоне создается избыточное давление пробного газа или смеси газа с воздухом необходимой концентрации. Для определения количества газа, проходящего через калиброванную течь, наконечник баллона погружают в ванночку со спиртом, после чего измеряют диаметр пузырька в момент его отрыва и время от начала образования пузырька до его отрыва. Количество газа, прошедшего через течь, упрощенно можно вычислить по формуле

$$Q = 0,4 \frac{d^3}{\Delta t} \frac{\text{л} \cdot \text{МКМ}}{\text{сек}}.$$

где d — диаметр пузырька в момент отрыва, мм;
 Δt — время образования одного пузырька, сек.

Для точного определения величины испытуемой течи целесообразно проверку чувствительности теческателя производить с помощью калиброванной течи того же порядка, что и измеряемая. Чувствительность теческателя к потоку Q калиброванной течи определяется путем отсчета показаний выходного прибора α с последующим расчетом по формуле.

$$S_Q = \frac{Q}{\alpha}.$$

В процессе проверки герметичности способом щупа рекомендуется через каждые 15—20 мин работы, а также по окончании испытаний проверять чувствительность течеискателя по калиброванной течи.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ГАЗОВ

Из всех рассмотренных методов контроля герметичности соединений наиболее простыми и доступными являются методы «аквариума», обмыливания мыльной эмульсией и замера спада давления. Однако, чувствительность этих методов не всегда может удовлетворить требованиям Т. У. Кроме того, недостатком этих методов является и то, что качество контроля во многом зависит от субъективных причин, от проверяющего требуется сосредоточения внимания и безукоризненное зрение. Применение мыльной эмульсии загрязняет и увлажняет испытываемый узел.

Наиболее совершенными методами, обладающие высокой чувствительностью и производительностью, являются методы течеискации. Практические пределы величины течей, выявляемые различными методами контроля, показаны по диаграмме рис. 20.

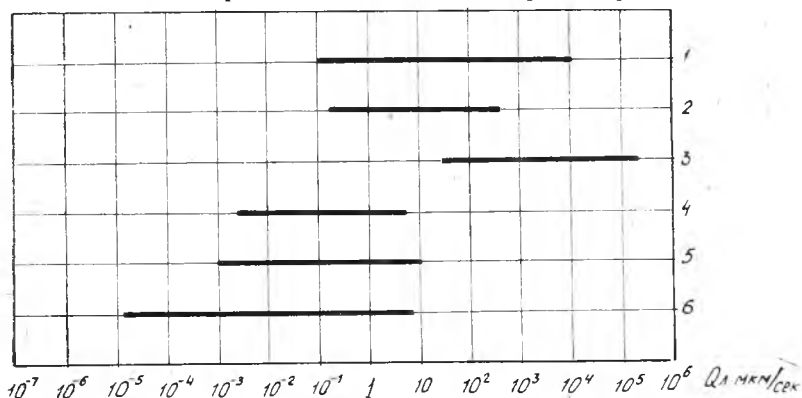


Рис. 20. Диаграмма практических пределов чувствительности различных методов контроля:

1 — метод «аквариума»; 2 — метод обмыливания; 3 — метод спада давления; 4 — метод галондного течеискателя; 5 — метод гелиевого течеискателя (способ щупа); 6 — метод гелиевого течеискателя (способ обдува)

ЛИТЕРАТУРА

- И. И. Горев. Основы производства жидкостных ракетных двигателей, изд-во «Машиностроение», 1969.
- Д. Ф. Гуревич. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры, изд-во «Машиностроение», 1964.
- Б. И. Королев, А. А. Быстров. Люминесцентный метод обнаружения места течи в электровакуумных приборах и их деталях. Сб. материалов по вакуумной технике, вып. XVI, Госэнергоиздат, 1958.
- Контроль непроницаемости сварных соединений, изд-во «Наукова думка», Киев, 1968.
- В. А. Ланис, Л. Е. Левина. Техника вакуумных испытаний; Госэнергоиздат, 1963.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Общие замечания	3
Требования, предъявляемые к герметичности соединений. Характеристика течей	6
Классификация методов контроля герметичности соединений при узловой и общей сборке двигателей	7
Контроль герметичности жидкостями	8
Контроль герметичности газами	13
Величина течи и размерность	14
Пневматические методы	15
Химические методы	22
Методы течеискания	23
Чувствительность течеискателей и проверка их работы	31
Общая характеристика методов контроля герметичности с помощью газов	33
Литература	34

ВАСИЛИИ АНДРЕЕВИЧ ЗАХАРОВ

**КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ
ПРИ СБОРКЕ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Учебное пособие по курсу

«Технология производства лопаточных аппаратов»

Редактор *И. С. Колышева*

Технический редактор *Н. М. Каленюк*

Корректор *Н. П. Гордеева*

Подписано в печать 16/XI-70 г. ЕО00311. Формат бумаги
60×90¹/₁₆. Объем 2,25 печ. л. Тираж 1000 экз. Цена 25 коп.

Куйбышевский авиационный институт им. С. П. Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Типография издательства «Волжская коммуна»,
г. Куйбышев, просп. К. Маркса, 201. Заказ № 6432.