

ДЕМОНСТРАЦИОННАЯ ВЕРСИЯ

Избранные страницы для ознакомления. Не полная книга.



**Максим Львович
Виноградов**

ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

**Методы испытаний
и вакуумная техника**

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА КОНТРОЛЯ

ЗАКАЗ ПОЛНОЙ ПЕЧАТНОЙ ВЕРСИИ

mail@leaklab.ru

Ознакомительный фрагмент

Перед вами демонстрационная версия книги. В неё включены полное оглавление и избранные страницы: основные понятия, расчёты, фотографии и схемы испытаний. Подборка позволяет оценить содержание и характер изложения.

Полный текст книги в этот файл не включён.

Содержание подборки

Стр. PDF

Введение и полное оглавление <i>Страницы книги 1-4</i>	3-6
Основы, термины и формулы <i>Страницы книги 5-14</i>	7-16
Выбор метода контроля <i>Страницы книги 134-135</i>	17-18
Проводимость и выбор насоса <i>Страницы книги 142-147</i>	19-24
Анализ остаточных газов <i>Страницы книги 187-189</i>	25-27
Учебное испытание камеры <i>Страницы книги 254-260</i>	28-34

В выдержках сохранены вёрстка и нумерация полной книги. Разделы приведены с пропусками; часть ссылок относится к материалам полного издания. Справа указаны страницы этого PDF; названия разделов доступны для перехода.

Полную книгу в печатном виде можно заказать:

mail@leaklab.ru

Герметичность изделия зависит от его конструкции, материалов, качества изготовления и условий эксплуатации. Достоверность заключения о герметичности определяется также подготовкой объекта, испытательным перепадом давления и способностью измерительной системы обнаружить недопустимую течь. В книге последовательно рассмотрены эти вопросы: от выбора нормы и метода до расчёта результата и принятия решения о годности.

При испытании на герметичность наблюдают перенос газа или жидкости через оболочку изделия и его соединения. Чтобы по этому наблюдению судить о качестве изделия, нужно связать требование к нему с условиями испытания и возможностями измерения. Эта связь определяет выбор метода, подготовку поверхности, схему подключения и порядок оценки результата.

Особое внимание необходимо уделять устойчивости оболочек при вакуумировании. Внешнее давление способно вызвать потерю устойчивости даже у конструкции, выдерживающей значительное внутреннее давление. Проверку прочности и устойчивости выполняют до назначения режима испытания.

Книга состоит из двух частей. В первой рассмотрены требования к герметичности, подготовка изделий, методы испытаний и оценка результатов. Во второй показано, как эти принципы применяют при расчёте вакуумных систем, диагностике газовых нагрузок, выборе оборудования и разборе практических случаев. Формулы сопровождаются условиями применимости и пояснениями обозначений.

В основу книги положен опыт испытаний оборудования энергетики, нефтехимии, машиностроения и криогенной

техники. Практические примеры показывают, как физические закономерности проявляются в реальной установке и почему подготовка изделия, выбор схемы и обработка сигнала должны рассматриваться совместно [94, 95, 96, 97, 98, 99, 100].

Назначение и структура книги

Пособие предназначено для инженеров, технологов и специалистов, которые разрабатывают и выполняют испытания на герметичность. В нём рассматриваются физические основы, подготовка изделий, организация лаборатории, измерительные схемы, расчёты и оценка результатов.

Требования к конкретному изделию определяют применяемая нормативная документация, конструкторские документы и согласованная программа испытаний. Область применения и действующую редакцию документа устанавливают до разработки технологической карты. Условия для одной отрасли нельзя автоматически переносить на другую.

Работу над методикой начинают с вопроса: какой перенос среды ещё допустим для данного изделия и как его воспроизвести при испытании? Затем выбирают пробный газ, задают давления с обеих сторон стенки и температуру, определяют направление перепада и готовят поверхность. Только после этого можно назначить чувствительность установки и правило принятия решения.

ГОСТ Р 50.05.01–2018 рассматривает контроль оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Его положения о подготовке, проверке чувствительности и документировании полезны для понимания организации испытаний; конкретные режимы и требования к персоналу

применяют с учётом области действия стандарта [86, раздел 1].

Нормативные документы связывают техническое требование с процедурой его проверки. При разработке испытания по ним выбирают метод, обосновывают допустимый поток и устанавливают условия измерения.

Программа должна учитывать конструкцию изделия, давление, температуру и срок службы. Прослеживаемость результата обеспечивают документированной связью с эталонами через непрерывную цепь калибровок, учитывая неопределённость каждого звена. Для этого применяют подходящие средства измерений и меры потока. Порядок проверки установки и правило принятия решения закрепляют в программе и протоколе [85, 86, 87, 88, 89; 92; 131, п. 6.5.1].

Оглавление

Назначение и структура книги	2
Часть I Испытания на герметичность	5
Общие понятия, термины и определения	5
Оценка потока и классы герметичности	15
Организация помещения лаборатории контроля герметичности	31
Требования к подготовке изделий к контролю герметичности	44
Оборудование и средства контроля герметичности	65
Гелиевый масс-спектрометрический контроль	70
Особенности пузырькового контроля	112
Манометрический метод контроля герметичности	116
Оценка качества и регистрация результатов контроля	120
Организация работы и компетентность лаборатории	125
Выбор метода и условий контроля	134
Часть II Практические решения в вакуумной технике	135
Расчёт испытательной системы	135
Источники газа и подготовка поверхностей	152
Измерительный тракт и достоверность показаний	161
Анализ остаточных газов	187
Чистота материалов и конструкция вакуумного изделия	190
Комплексная вакуумная приёмка	202
Криогенные системы и резервуары	209
Протяжённые системы и локализация сложных течей	232
Вакуум при рабочих энергетических воздействиях	243
Моделирование молекулярного течения	245
Автоматизация и программа комплексного испытания	248
Течеискатели и испытательные установки	262
Измерение давления и выбор вакуумметра	314
Вакуумные насосы и подготовка газового тракта	342
Арматура, газовые линии и уплотнения	398
Обслуживание оборудования и подготовка персонала	414
Обозначения физических величин	446
Список использованных источников	447
Заключение	454

Часть I Испытания на герметичность

Чтобы испытание дало обоснованный результат, требование к изделию связывают с воспроизводимыми условиями нагружения и измерения. Для этого назначают норму, подготавливают изделие, выбирают способ контроля и правило оценки соответствия. См. рис. 1.



Рисунок 1 — Контроль соединений крупногабаритной камеры. Доступ к каждому участку и наблюдение за сигналом предусматривают при подготовке маршрута обследования.

Общие понятия, термины и определения

Герметичность — свойство изделия препятствовать переносу вещества через его стенки и соединения. Её оценивают относительно заданной нормы и подтверждённых возможностей метода. Отсутствие зарегистрированного сигнала означает, что в условиях испытания поток не

обнаружен; оно не доказывает отсутствие переноса вещества при любых условиях [89].

Требования к герметичности должны соответствовать назначению изделия. Чем меньше допустимый поток, тем выше требования к подготовке, чувствительности установки и стабильности условий. Необоснованное ужесточение нормы увеличивает длительность и стоимость контроля, не обязательно улучшая эксплуатационные свойства изделия.

Если допустимый поток не задан, его определяет разработчик по условиям эксплуатации: сроку службы, допустимой потере рабочей среды, изменению давления и последствиям натекания. После этого требование переводят в критерий испытания для выбранного пробного газа и режима нагружения.

Течь — сквозная несплошность в виде канала в стенке изделия или соединении его элементов, через который проходит газ либо жидкость. Реальные каналы имеют сложную форму: переменное сечение, ответвления и участки с различной шероховатостью. По измеренному потоку можно оценить диаметр эквивалентного цилиндрического канала, но только при заданных длине, режиме течения и свойствах среды. Такая оценка не определяет фактические размеры дефекта.

Визуальный осмотр позволяет обнаружить часть поверхностных дефектов, но не подтверждает герметичность соединения. Узкий сквозной канал может быть скрыт оксидной плёнкой или иметь выход, неразличимый при осмотре. Напротив, видимая поверхностная трещина не обязательно является сквозной. Наличие пути переноса газа устанавливают испытанием с заданной чувствительностью.

Для обнаружения малых газовых потоков применяют, в частности, гелиевые масс-спектрометрические течеискатели. Они регистрируют пробный газ, прошедший через дефект, а место его выхода определяют выбранным способом обследования.

Поток газа в течеискании обычно выражают произведением давления на объём, переносимый за единицу времени, в $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$. Объёмный расход газа или жидкости выражают в $\text{м}^3/\text{с}$. Для пересчёта газового объёмного расхода обязательно указывают давление и температуру.

Допустимый поток устанавливают в документации на изделие. Решение принимают по результату измерения и согласованному правилу оценки соответствия. При этом малая течь не делает допустимым любой дефект: трещина, опасная по условиям прочности или долговечности, требует отдельной оценки независимо от измеренного потока.

Эквивалентная величина течи — поток выбранного газа через дефект при согласованных опорных условиях. В записи нормы указывают газ, абсолютные давления с обеих сторон и температуру; выражение «нормальные условия» без численных значений недостаточно.

Индикаторное вещество — вещество, взаимодействие которого с пробной средой создаёт наблюдаемый признак течи, например изменение окраски.

Индикаторное средство — состав или материал, содержащий индикаторное вещество и необходимые носители либо технологические добавки.

Испытание на герметичность — экспериментальное определение количественных или качественных характеристик переноса вещества через изделие при заданных

условиях. При контроле герметичности полученные характеристики сопоставляют с установленными требованиями.

При испытании создают заданный перепад давления и регистрируют пробное вещество, прошедшее через возможные течи. Нагружение должно воспроизводить существенные условия эксплуатации либо иметь обоснованную связь с ними.

Испытательный перепад давления назначают по программе, учитывающей рабочие условия, прочность и устойчивость изделия. Его направление должно воспроизводить значимое для эксплуатации нагружение либо иметь обоснованную связь с ним. Самовольное повышение давления ради увеличения сигнала недопустимо.

Результат контроля характеризует изделие в установленных условиях испытания. Заключение о соответствии относится к заданной норме, обследованным участкам и подтверждённым возможностям метода.

Контрольная среда — газ или жидкость, содержащие установленное количество пробного вещества.

Контрольная течь — устройство или контрольный образец с реальной либо искусственно созданной течью определённой величины. Её используют для настройки и проверки способности установки обнаруживать течи в заданных условиях [86, п. 3.19].

Для количественной калибровки используют меру с известным потоком, его неопределённостью и документированными условиями воспроизведения. Контрольный образец, подтверждающий только обнаружение дефекта, не заменяет такую меру. Проверка установки по контрольной течи не заменяет обязательных метрологических процедур

для применяемого средства измерений. Пригодность меры определяется её документами, условиями применения и стабильностью.

Негерметичность изделия характеризуют потоком газа или расходом жидкости через его течи в заданных условиях эксплуатации или испытания. Она может относиться к отдельной течи либо ко всему изделию. Ненулевое значение само по себе не означает брака: его сопоставляют с нормой. При диагностике отдельно учитывают проницаемость материала и газовыделение внутренних поверхностей.

Пороговая чувствительность системы контроля — традиционное для течеискания название наименьшего потока, обнаруживаемого всей установкой в установленных условиях. В количественных расчётах ниже эта характеристика обозначена как порог обнаружения установки.

Чувствительность измерительной системы — отношение изменения показания к вызвавшему его изменению измеряемой величины. Для течеискателя это отношение приращения сигнала к приращению потока пробного газа. Чувствительность отличается от порога обнаружения: большой отклик на единицу потока ещё не обеспечивает обнаружения малой течи при значительном шуме или дрейфе фона [132].

Порог обнаружения всей системы обычно выше паспортного минимального обнаруживаемого потока течеискателя: влияют магистрали, фон, деление потока, время отклика и оснастка. При накоплении измеряемое количество газа увеличивается со временем, поэтому характеристики системы сопоставляют с характеристиками прибора только

при одинаковом определении результата и времени наблюдения.

Норма герметичности задаёт допустимый поток изделия, а порог обнаружения — возможность установки его заметить. Если достигнутый порог выше допустимого потока, отсутствие отклика не позволяет принять изделие: сначала улучшают условия измерения или выбирают более подходящий способ. Пригодность установки подтверждают при тех же газе, времени наблюдения и конфигурации, которые будут использованы при испытании.

Поток газа в вакуумной технике — величина, равная произведению абсолютного давления на объёмный расход газа при той же температуре. Единица потока в СИ — $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$.

Пробное вещество — компонент, прохождение которого через течь регистрируют при контроле. В зависимости от задачи используют рабочую среду изделия, специально выбранный газ или добавку к контрольной среде.

Рабочая среда (вещество) — вещество (газ или жидкость), заполняющее герметизированное изделие при эксплуатации или хранении.

Реалистичная течь — намеренно созданный дефект контрольного образца, воспроизводящий существенные особенности течи реального изделия. Такой образец помогает проверить обнаружение в условиях, которые трудно воспроизвести одной мерой потока на входе прибора.

Место контрольной течи выбирают так, чтобы воспроизвести наиболее неблагоприятные условия обнаружения. В вакуумной системе учитывают проводимость трактов и перенос газа из дальних, тупиковых и экранированных

полостей; в щуповой — доступ к дефекту, потери при захвате газа и движение насадки. Для разветвлённого изделия проверяют несколько характерных точек.

Реальная течь — течь, образовавшаяся в объекте контроля во время его производства или эксплуатации без преднамеренного вмешательства.

Система контроля герметичности объединяет метод испытания, подготовку изделия, измерительные средства и оснастку. Её пригодность оценивают для всей последовательности операций, от подготовки до принятия решения.

Величины и единицы измерения

Поток газа Q в течеискании характеризует перенос количества вещества и выражается в $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$. Объёмный расход q_v выражается в $\text{м}^3/\text{с}$; он зависит от давления и температуры, при которых определён объём. Массовый расход выражается в $\text{кг}/\text{с}$. Эти величины нельзя подменять друг другом. В расчётах используют абсолютное давление; избыточное давление отдельно обозначают и складывают с атмосферным для получения абсолютного.

$$Q = p q_v = R T \dot{n} \quad (1)$$

Q — поток газа, $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$; p — абсолютное давление в сечении, к которому отнесён объёмный расход, Па ; q_v — объёмный расход при этом давлении и температуре, $\text{м}^3/\text{с}$; $\dot{n}$ — молярный расход, $\text{моль}/\text{с}$; $R = 8,314462618 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура газа, К . Соотношение применимо к идеальному газу. При заметной неидеальности учитывают коэффициент сжимаемости Z .

$$Q_{ref} = R T_{ref} \dot{n} \quad (2)$$

Q_{ref} — поток, приведённый к выбранной температуре T_{ref} , Па·м³/с; T_{ref} — температура приведения, К; $\dot{n}$ — молярный расход, моль/с. Температуру приведения указывают вместе с результатом. При неизменном количестве вещества численное значение pV зависит от температуры, поэтому сравнение потоков при разных температурах требует приведения.

$$\dot{m} = \frac{M Q_{ref}}{R T_{ref}} \quad (3)$$

$\dot{m}$ — массовый расход, кг/с; M — молярная масса газа, кг/моль; Q_{ref} — поток при температуре T_{ref} , Па·м³/с; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T_{ref} — температура приведения, К. Для смеси используют её молярную массу. Это пересчёт количества вещества, а не способ предсказать течение другого газа через тот же дефект.

$$\dot{N} = \frac{Q}{k_B T} \quad (4)$$

$\dot{N}$ — число частиц, проходящих за секунду, с⁻¹; Q — поток газа при температуре T , Па·м³/с; $k_B = 1,380649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T — температура газа, К. Для гелия считают атомы, для молекулярного газа — молекулы. Например, при $Q = 5 \cdot 10^{-13}$ Па·м³/с и $T = 293,15$ К проходит приблизительно $1,24 \cdot 10^8$ атомов гелия за секунду.

В формулах этой книги давление задают в Па, объём — в м³, время — в с, температуру — в К. Для описания размеров и режимов допускаются десятичные кратные и дольные единицы СИ. Температуру поверхности можно задавать в °С, но в газовых уравнениях используют $T = \theta + 273,15$, где

θ — температура в °С. Показания прибора сначала переводят в согласованный набор единиц, затем подставляют в формулу.

Объёмная или молярная доля гелия x — безразмерная величина. Для идеальной газовой смеси эти доли совпадают. Например, 10 % соответствует $x = 0,1$, а одна миллионная доля — $x = 10^{-6}$. В расчёте нельзя подставлять число 10 вместо 0,1. Естественное содержание гелия в воздухе имеет порядок $5 \cdot 10^{-6}$; фактический фон на участке измеряют, поскольку он меняется после подачи и сброса пробного газа.

Пересчёт между газами и условиями испытания

Норма герметичности имеет смысл только вместе с указанием газа, температуры и давлений с обеих сторон изделия. Поток гелия нельзя автоматически считать потоком воздуха или потерей рабочей жидкости. В микроканале возможны молекулярное, вязкостное и переходное течение; режим зависит от размера канала и давления, а сам дефект может изменяться под нагрузкой.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \quad (5)$$

Q_1 и Q_2 — потоки двух чистых газов через неизменный канал, Па·м³/с; M_1 и M_2 — их молярные массы в одинаковых единицах. Формула справедлива для молекулярного режима при одинаковых температуре и разности давлений. При этих условиях поток гелия приблизительно в 2,69 раза больше потока воздуха. Чтобы пересчитать измеренный гелиевый поток в воздушный, его делят на 2,69. Этот коэффициент

нельзя применять к вязкостному течению, жидкости или неизвестному режиму.

$$Q = \frac{\pi r^4}{16 \eta L} (p_1^2 - p_2^2) \quad (6)$$

Q — поток идеального газа при температуре канала, $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$; r — радиус длинного круглого капилляра, м ; L — его длина, м ; η — динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$; p_1 и p_2 — абсолютные давления на входе и выходе, Па . Это изотермическая модель ламинарного вязкостного течения без скольжения. Для коротких отверстий, трещин неизвестной формы, молекулярного и переходного течения модель непригодна.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{p_{12}^2 - p_{22}^2}{p_{11}^2 - p_{21}^2} \quad (7)$$

Q_1 и Q_2 — потоки одного газа через один неизменный капилляр при двух режимах испытания, $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$; p_{11} и p_{21} — входное и выходное давления первого режима, Па ; p_{12} и p_{22} — давления второго режима, Па . Температура и вязкость должны оставаться одинаковыми. Изменение давления может раскрыть или закрыть реальную трещину; тогда пересчёт по неизменной геометрии недостоверен.

Для оценки переноса жидкости дополнительно нужны её вязкость, поверхностное натяжение, смачиваемость и состояние канала. Газовое испытание само по себе не доказывает стерильность упаковки и не устанавливает размер частиц, способных проникнуть в неё. Связь между газовым потоком и требованием к жидкости или микробиологическому барьеру подтверждают специальной валидацией.

Выбор метода и условий контроля

Таблица 5 — Выбор метода и условий контроля

Способ	Подготовка и нагрузка	Что проверяют при подготовке и оценке
Вакуумная камера	Сухое изделие, контрольный газ внутри, вакуум снаружи	Норму потока; прочность изделия и камеры; внешний контрольный поток
Камера внешнего давления	Вакуум внутри изделия, газ снаружи	Устойчивость оболочки; состав газа; полный охват
Обдув гелием	Вакуум внутри; локальная подача снаружи	Время отклика и положение течи; для измерения потока — известный состав газа и отклик
Гелиевый щуп	Газ внутри; отбор снаружи	Динамический порог, зазор, скорость и полноту захвата газа щупом
Местная вакуумная камера	Камера на участке; пробный газ с другой стороны	Перекрытие зон; герметичность уплотнения; отклик
Пузырьковый	Перепад давления газа через стенку; индикаторная плёнка или погружение	Совместимость жидкости, чувствительность, непрерывность наблюдения и доступность всей зоны
Атмосферное накопление	Замкнутая оболочка вокруг заполненного изделия	Свободный объём, состав, время, перемешивание и потери

Способ	Подготовка и нагрузка	Что проверяют при подготовке и оценке
Манометрический	Изолированный объём после стабилизации	Температуру, объём, фон оснастки, точность давления
Опрессовка замкнутой оболочки	Внешняя выдержка в гелии, затем измерение	Времена этапов, объём, модель течения и крупные дефекты
Термовакuumный	Согласованный нагрев и перепад давления	Термостойкость, фон и чувствительность на каждом режиме

Часть II Практические решения в вакуумной технике

В реальной установке сигнал зависит не только от течи. Проводимость трубопроводов, газовыделение поверхностей, работа насосов и состояние измерительного тракта определяют, что именно увидит оператор. Во второй части расчётные модели сопоставлены с учебными примерами и документированными случаями диагностики. Численные требования из отдельных проектов относятся к описанным изделиям и условиям.

Расчёт испытательной системы

Расчёт испытательной системы начнём с газового баланса: определим, какой поток через течи допустим при заданной откачке и прочей газовой нагрузке. Затем оценим проводимость тракта, время отклика и влияние геометрии изделия.

Молекулярный поток и роль массы газа

Средняя тепловая скорость молекул равна:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (59)$$

где $\bar{v}$ — средняя скорость, м/с; M — молярная масса, кг/моль; R — газовая постоянная, Дж/(моль·К); T — температура, К. При одинаковой температуре лёгкие молекулы движутся быстрее тяжёлых.

Для отверстия в тонкой стенке в молекулярном режиме:

$$C_{\text{отв}} = \frac{A\bar{v}}{4} \quad (60)$$

где $\bar{v}$ — средняя тепловая скорость молекул, м/с; $C_{\text{отв}}$ — проводимость отверстия, м³/с; A — его площадь, м². Для канала конечной длины эту величину умножают на вероятность прохождения молекулы от входа к выходу:

$$C = \alpha C_{\text{отв}} \quad (61)$$

где C — проводимость канала, м³/с; $C_{\text{отв}}$ — проводимость входного отверстия, м³/с; α — безразмерная вероятность прохождения, от нуля до единицы. Она зависит от геометрии и модели отражения от стенок. Молекула может войти в трубопровод, несколько раз отразиться и вернуться обратно; сам факт входа ещё не означает передачу газа на другую сторону [2; 36; 72, 73, 74].

Для одного канала при одинаковой температуре молекулярная проводимость гелия приблизительно в 2,69 раза выше проводимости воздуха. Это следует из корня отношения молярных масс 0,02897 и 0,004 кг/моль. Коэффициент относится к молекулярной проводимости; он не является универсальной поправкой для любой течи, любого уплотнения и любого давления.

Капиллярная модель течи

Для длинного круглого капилляра применяют формулу (6) первой части. Она описывает ламинарное изотермическое течение идеального газа при пренебрежимо малом скольжении у стенки и малых инерционных эффектах. Все размеры в расчёте выражают в метрах, давления — в паскалях, динамическую вязкость — в Па·с.

Формула (6) применима, пока принятые условия выполняются по существенной части канала. При сильном разрежении у выхода, переходе к молекулярному течению или значительном ускорении газа она требует уточнения. Четвёртая степень радиуса объясняет высокую чувствительность расхода к геометрии: при прочих равных увеличение радиуса на 10 % повышает поток примерно на 46 %. Однако по одному измеренному потоку нельзя однозначно восстановить форму дефекта. Различные сочетания длины, ширины и извилистости канала могут дать одинаковый результат.

Эффективная быстрота откачки изделия

Быстрота откачки на фланце и в камере

Большой насос не гарантирует большой быстроты откачки в изделии. Между ними находятся переходники, клапаны, фильтры и шланги. Для последовательного соединения насоса и трубопровода используют формулу (17) первой части; все характеристики должны относиться к одному газу и соответствующему режиму течения [1, 2].

Пример 10 — Учебный расчёт: почему замена насоса почти не помогла

Насос с быстротой $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ соединён с камерой каналом проводимостью $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$. Эффективная быстрота составляет $0,00909 \text{ м}^3/\text{с}$. Замена насоса на $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$ повышает её лишь до $0,00968 \text{ м}^3/\text{с}$. Несмотря на трёхкратное увеличение паспортной быстроты, эффективная быстрота у изделия выросла лишь примерно на $6,5 \%$. В такой ситуации больший эффект даёт укорочение и расширение соединительной линии.

Для последовательных участков суммируют величины, обратные проводимости; для параллельных каналов между одними и теми же узлами — сами проводимости. Такое представление требует, чтобы узлы можно было характеризовать едиными давлениями, а используемые проводимости соответствовали газу и режиму течения. В сложной геометрии, где эти условия не выполняются, составляют пространственную модель переноса газа.

Для графика 1 проводимость линии принята равной $0,025 \text{ м}^3/\text{с}$. При скорости насоса $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ эффективная быстрота равна $0,02 \text{ м}^3/\text{с}$. Удвоение скорости насоса даёт около $0,0222 \text{ м}^3/\text{с}$, то есть прирост лишь 11% . Кривая показывает, когда повышение проводимости линии даёт больший эффект, чем выбор насоса с большей скоростью откачки. При зависимости проводимости от давления расчёт выполняют для соответствующего режима.

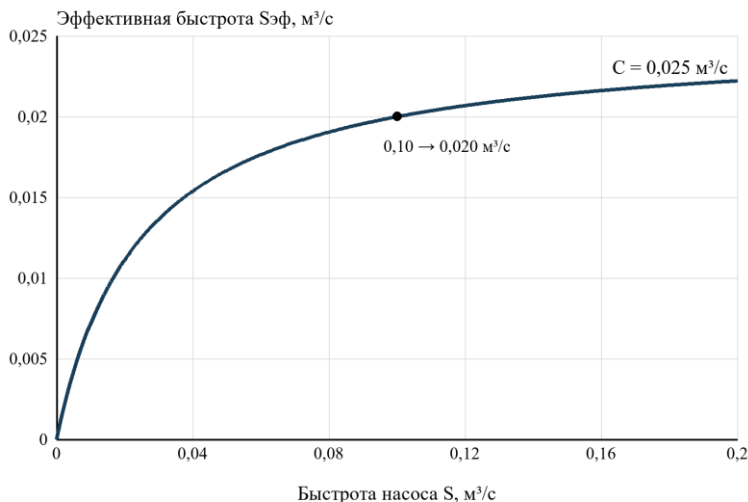


График 1 — Ограничение эффективной скорости проводимостью линии 0,025 м³/с. Расчёт для последовательного соединения.

Длинная труба

Для длинной прямой круглой трубы с диффузным отражением в молекулярном режиме:

$$C \approx \frac{\pi D^3 \bar{v}}{12L} \quad (62)$$

где D — внутренний диаметр трубы, м; L — длина, м; $\bar{v}$ — средняя скорость молекул, м/с. Приближение применимо, если L значительно больше D . Для коротких труб учитывают входное сопротивление и более точную вероятность прохождения.

В этой модели проводимость пропорциональна кубу диаметра: удвоение диаметра увеличивает её примерно в восемь раз. Изгибы, гофры, экраны, фильтры и арматура обычно уменьшают проводимость по сравнению с гладкой прямой трубой. Поэтому формулу (62) нельзя без поправок

применять к гофрированному шлангу или сложному соединительному тракту. См. рис. 27.

Насос рядом, а путь газа длинный

На площадке прибор ставят там, где есть свободное место и питание. Между ним и изделием остаются шланг, переходники и клапаны. Подключение кажется простым, пока оператор не замечает, что сигнал появляется слишком поздно или оказывается слабее ожидаемого (рис. 28).



Рисунок 27 — Соединение гофрированного трубопровода с патрубком. Гофры, сужения и переходы учитывают при оценке проводимости измерительного тракта.

В такой ситуации проверяют весь собранный тракт. Контрольный поток вводят в представительной точке изделия и наблюдают отклик при рабочем положении клапанов. Проверка только на входе течеискателя не воспроизводит сопротивление соединительной линии. После её укорочения или

изменения схемы чувствительность и время реакции определяют заново.

Причина может заключаться в малой проводимости соединения. Тогда замена исправного насоса более мощным даст меньший эффект, чем устранение узкого участка. Поэтому при диагностике сначала прослеживают путь пробного газа от изделия до анализатора и проверяют участки, ограничивающие его перенос.



Рисунок 28 — Соединительная линия у торцевого узла крупного аппарата. При оценке отклика учитывают её длину, сечение и положение арматуры.

Анализ остаточных газов

Масс-спектр остаточного газа содержит сведения о составе среды, но не даёт однозначного ответа по каждому отдельному пику. Один компонент образует несколько типов ионов, а ионы разных компонентов могут иметь одинаковое отношение массы к заряду. Например, азот и оксид углерода дают сигнал в номинальном канале 28. Для интерпретации сравнивают совокупность пиков, их изменение со временем и реакцию на контролируемые воздействия [7; 19; 23, 24, 25, 26].

От отдельного пика к физической гипотезе

Интерпретацию начинают с выбора механизма, способного объяснить всю совокупность наблюдений. При предполагаемой воздушной течи проверяют несколько характерных компонентов и отклик на наружную подачу гелия. Водяной фон обычно меняется при откачке и прогреве. Органические загрязнения могут давать группы фрагментных пиков, интенсивность которых зависит от температуры. Для мнимой течи характерен длительный выход ранее захваченного газа.

Однако ни одно из этих наблюдений само по себе не позволяет однозначно установить причину. Насосная система меняет относительные давления, поверхности поглощают некоторые компоненты, а чувствительность анализатора зависит от рода газа. Поэтому заключение формулируют как проверяемую гипотезу: например, «наблюдения согласуются с поступлением воздуха; требуется подтверждение гелиевым воздействием».

Линейная модель спектра в заданных условиях имеет вид:

$$I_j = I_{0,j} + \sum_i a_{ji} p_i \quad (89)$$

где I_j — ток в j -м массовом канале, А; $I_{0,j}$ — фоновый ток этого канала, А; p_i — парциальное давление i -го компонента, Па; a_{ji} — коэффициент, включающий чувствительность и долю соответствующего ионного фрагмента, А/Па.

Номер массового канала соответствует номинальному отношению массы иона к числу элементарных зарядов; это не всегда масса исходной молекулы. Коэффициенты a_{ji} зависят от энергии электронов, настройки источника, разрешения, детектора и состояния прибора. Библиотечные спектры помогают распознавать компоненты, но для количественного анализа необходима калибровка. Если два компонента дают близкие наборы пиков, их разделение становится неустойчивым: малая ошибка исходных токов может заметно изменить рассчитанный состав.

Что даёт временной ряд

Одиночный спектр характеризует состояние системы в момент регистрации. Последовательность спектров позволяет проследить процесс: установить, какие компоненты быстро удаляются, какие сохраняются и какие появляются при нагреве. Совместная запись выбранных массовых каналов, общего давления и событий управления помогает отделить поступление газа от изменения режима прибора.

Нормирование спектра удобно для сравнения формы, но скрывает абсолютный уровень. Два спектра, приведённые к одному максимальному пику, могут выглядеть одинаково при разнице суммарного давления в тысячу раз. Поэтому

рядом с нормированными отношениями сохраняют исходные токи или откалиброванные парциальные давления, режим детектора и параметры источника.

Пример 22 — Учебная ситуация: пик 28 без поспешного вывода

В камере вырос сигнал массового канала 28. Если одновременно меняются сигналы в каналах, характерных для кислорода и аргона, и возникает воспроизводимый отклик на гелий у конкретного шва, это служит дополнительным доводом в пользу воздушной течи. Если изменение связано с нагревом загрязнённой детали и сопровождается углеродсодержащими фрагментами без локального гелиевого отклика, следует исследовать газовыделение. По одному сигналу в канале 28 различить эти причины нельзя.

Программная регистрация

Программное обеспечение LV4RGA позволяет работать с несколькими типами анализаторов, сохранять конфигурации, автоматически записывать данные, накладывать спектры и наблюдать выбранные массовые каналы [66]. Архив настроек и измерений помогает восстановить условия опыта и проследить изменение сигнала.

При смене усилителя, включении вторичного электронного умножителя или изменении энергии электронов прежние коэффициенты могут стать неприменимыми. В архиве сохраняют эти события вместе с измерениями. При выборе программного обеспечения проверяют функции установленной версии, формат исходных данных и возможность восстановить условия измерения.

Пример 26 — Учебное испытание вакуумной камеры

Рассмотрим условную камеру объёмом $0,2 \text{ м}^3$ с металлическими стенками и одним эластомерным уплотнением. Требуется подтвердить, что при общем воздействии чистого гелия суммарный поток через все контролируемые границы не превышает $1 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$. Давления, температура и длительность воздействия заданы программой испытания; заключение относится именно к этим условиям.

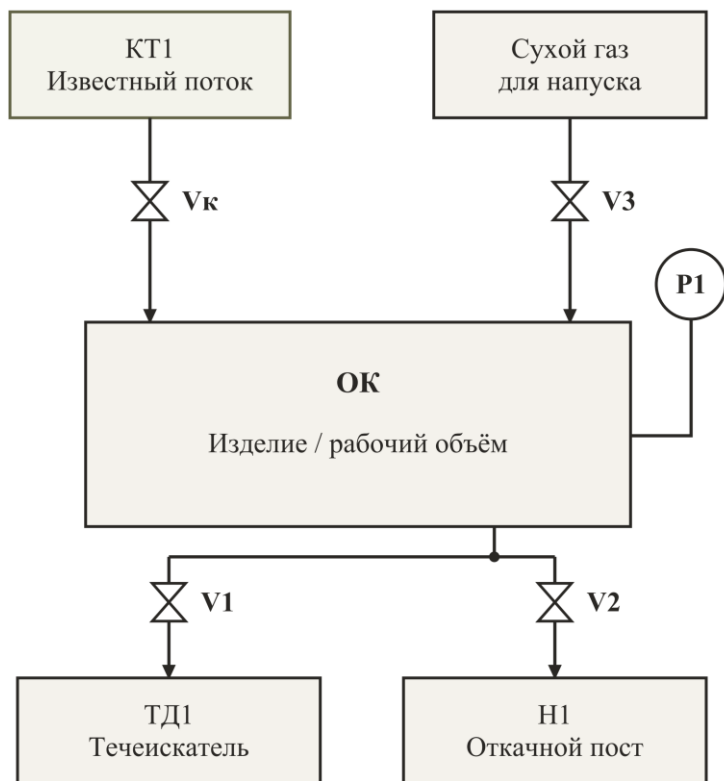
Газовая схема

Паспортная быстрота насоса по рассматриваемому газу составляет $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$, проводимость соединительного тракта — $0,0125 \text{ м}^3/\text{с}$. По формуле последовательного соединения сопротивлений эффективная быстрота равна $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$. Для простой модели постоянная времени камеры составляет 20 с.

Если бы оператор использовал паспортную быстроту, он получил бы постоянную времени 4 с и мог назначить слишком короткую выдержку. Уже на этом этапе расчёт показывает, что проводимость влияет не только на давление, но и на достоверность заключения.

Проверка контрольной течью

В удалённой точке подключают контрольную течь с потоком $2 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$. После учёта её температуры получают устойчивое приращение условного сигнала 100 единиц. Фон до воздействия составляет 20 единиц. Измеренный переходный процесс показывает, что 95 % приращения достигаются за 70 с, то есть несколько медленнее простой модели (рисунок 51).



КТ1 подключена к удалённому порту ОК

Фон → КТ1 → восстановление фона

V1 и V2 — как при испытании

Рисунок 51 — Проверка тракта вакуумной камеры

КТ1 — контрольная течь в удалённой точке; ОК — рабочий объём;

P1 — вакуумметр у объёма; ТД1 — течеискатель; Н1 — вспомогательная откачка. Vк включает известный поток, V1 и V2 задают рабочий тракт, V3 служит для напуска сухого газа.

Контрольный газ проходит через рабочий объём и ту же конфигурацию откачных ветвей, что и газ от изделия.

Записывают фон при закрытом V_k , открывают V_k и измеряют задержку и установившееся приращение. Затем V_k закрывают и наблюдают восстановление. V_1 и V_2 во время проверки находятся в том же положении, что при контроле изделия. После переключения ветвей прежний коэффициент пересчёта сигнала применять без проверки нельзя (график 3).

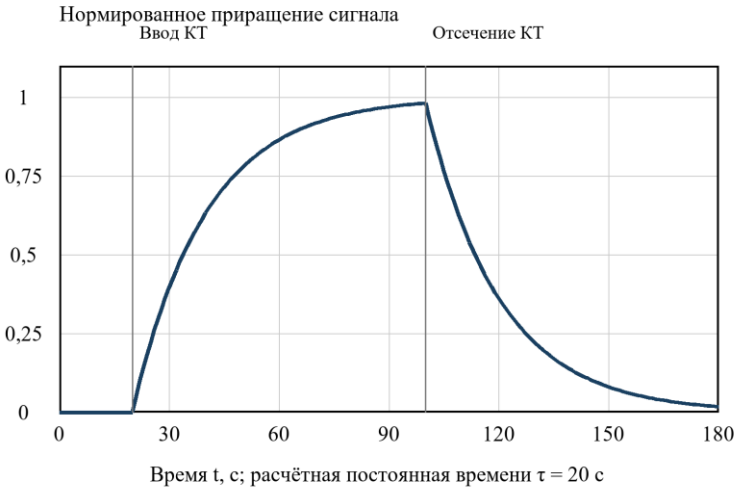


График 3 — Ввод контрольного потока и восстановление фона.
Учебный расчёт для $\tau = 20$ с; не запись реального испытания.

На графике поток включён в момент 20 с и отключён в момент 100 с. За 60 с после включения сигнал достигает примерно 95 % установившегося приращения, а за 60 с после отключения остаточное приращение уменьшается примерно до 5 % уровня в момент отключения. Использована модель первого порядка по формуле (85), без дополнительной задержки. Реальную выдержку устанавливают по опыту с контрольной течью; приведённые выше 70 с относятся к

условному примеру установки, а не к этому расчётному графику.

Для дальнейшей работы принимают проверенную выдержку с предусмотренным запасом, а не расчётные 60 с без учёта опыта. Камеру испытывают под общей гелиевой оболочкой, подтвердив состав газа и его доступ ко всем контролируемым поверхностям. Пусть в заданном измерительном интервале полное показание стабилизировалось на 50 единицах при исходном фоне 20. Приращение равно 30, поэтому по формуле (83) суммарный поток гелия составляет $2 \cdot 10^{-8} \cdot 30 / 100 = 6 \cdot 10^{-9}$ Па·м³/с. Результат отдельного локального обдува не позволил бы подтвердить этот суммарный критерий.

Решение с учётом неопределённости

Для этого учебного расчёта составим бюджет неопределённости по модели сравнения (83). Примем, что расширенная относительная неопределённость меры равна 6 % при коэффициенте охвата 2; относительные стандартные неопределённости приращений изделия и меры равны соответственно 10 % и 4 %. Эти приращения уже учитывают измерение и вычитание фона. Остаточное изменение распределения потока оценим стандартным вкладом 8 %. Все входные оценки относятся к одной рабочей конфигурации.

В качестве условных исходных данных примем две независимые серии: девять определений приращения изделия со средним 30 единиц и выборочным стандартным отклонением 9 единиц; шестнадцать определений приращения меры со средним 100 единиц и стандартным отклонением 16 единиц. Стандартные неопределённости средних равны $9/\sqrt{9} = 3$ и $16/\sqrt{16} = 4$ единицы. Относительные вклады составляют

$3/30 = 10 \%$ и $4/100 = 4 \%$. Это расчёт для независимых повторов без дрейфа; при временной корреляции деление на квадратный корень из числа отсчётов не обосновано.

Расчёт бюджета неопределённости

Поток меры после температурной поправки равен $2 \cdot 10^{-8}$ Па·м³/с. В окрестности рабочей температуры относительная чувствительность этого потока к температуре принята равной $0,03 \text{ K}^{-1}$, а стандартная неопределённость температуры — $0,5 \text{ K}$. Температурный вклад равен $0,015$, то есть $1,5 \%$. Неопределённость коэффициента уже включена в оценку меры; повторно её не добавляют. Для реальной меры используют её свидетельство и температурную характеристику, вычисляя чувствительность для фактической рабочей температуры.

Вклад меры приводят к стандартному виду: $6 \% / 2 = 3 \%$. Для остальных независимых вкладов приняты стандартные значения 10% , 4% , 8% и $1,5 \%$. Вклад 8% характеризует остаточную воспроизводимость деления потока и установки после проверки; он не означает внесение произвольной поправки к результату.

$$u_r(Q) = \sqrt{0,03^2 + 0,10^2 + 0,04^2 + 0,08^2 + 0,015^2} \approx 0,138$$

$u_r(Q)$ — суммарная относительная стандартная неопределённость. Для модели произведения и отношения относительные коэффициенты чувствительности по модулю равны единице. Суммирование квадратов допустимо при принятых независимости вкладов и линейном приближении; общий фон или общая градуировка могут создавать корреляцию.

$$u_c = 6 \cdot 10^{-9} \cdot 0,138 \approx 0,83 \cdot 10^{-9} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$$

$$U = 2u_c \approx 1,7 \cdot 10^{-9} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$$

u_c — суммарная стандартная неопределённость потока;
 U — расширенная неопределённость при коэффициенте охвата 2. В этом учебном расчёте предполагаются достаточные степени свободы и распределение результата, позволяющее использовать этот коэффициент для интервала охвата приблизительно 95 %. Относительные вклады не являются паспортными допусками какого-либо прибора.

Для рассмотренного устойчивого режима результат записывают как $Q = (6 \pm 1,7) \cdot 10^{-9} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ при $k = 2$, указывая газ и условия. Верхняя граница $7,7 \cdot 10^{-9} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ меньше нормы $1 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ и удовлетворяет правилу (52). Окончательное заключение, однако, принимают после проверки всего предусмотренного цикла и заключительного контроля чувствительности: изменение сигнала или фона может потребовать пересмотра этой оценки.

При результате $9 \cdot 10^{-9} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ и тех же относительных вкладах расширенная неопределённость составила бы около $2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$. Верхняя граница $1,15 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ превышает допуск. По принятому правилу положительное решение невозможно; действуют по согласованной процедуре, не выбирая минимальное показание из повторов.

Медленный сигнал от уплотнения

При продолжении общего воздействия гелием измеряемый сигнал начал медленно расти. Локальный краткий обдув металлического шва не воспроизводил быстрый отклик. Такая картина может быть связана с проницаемостью эластомера или накоплением гелия в окружающей оснастке, но

пока это только гипотеза. Растущую составляющую нельзя заранее считать фоном, не связанным с изделием.

Для проверки сравнивают временные зависимости, контролируют состав газа под оболочкой и исключают его остаточное накопление в окружающей оснастке. После восстановления условий повторяют воздействия на отдельные области. Если рост возник в предусмотренном измерительном интервале или изменил использованный фоновый отсчёт, прежние $6 \cdot 10^{-9}$ Па·м³/с и их неопределённость уже не обосновывают заключение: вклад оценивают по согласованной модели и при необходимости повторяют цикл. Если конструкция и программа допускают защитный объём или другую схему разделения вкладов, их применяют после проверки чувствительности. Медленную составляющую не вычитают произвольно ради выполнения допуска.

Завершение

После испытания контрольная течь вновь даёт приращение 98 единиц при сопоставимом фоне. Допустимость изменения со 100 до 98 единиц оценивают по заранее принятому критерию. Успешная заключительная проверка подтверждает состояние измерительного тракта, но сама по себе не объясняет медленный рост сигнала от изделия. В отчёт включают газовую схему, обе проверки чувствительности, полный временной ряд и результаты диагностических действий. Окончательное решение принимают после установления применимости расчёта ко всему заданному интервалу; до этого оснований для безусловного заключения о годности нет.

Максим Львович Виноградов

ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

Методы испытаний
и вакуумная техника

454 страницы основного текста

От физических основ и выбора метода контроля до расчёта вакуумной системы и оценки результатов. В книге рассмотрены подготовка изделий, измерительные схемы, работа с оборудованием и практические задачи испытаний.

Заказ печатной книги

Полную книгу в печатном виде можно заказать по электронной почте:

mail@leaklab.ru

В письме укажите количество экземпляров и город доставки.

Демонстрационная версия содержит только избранные страницы. Полный текст книги в этот файл не включён.