



Основы течеискания



Предисловие

Компания Leybold GmbH, в настоящее время часть группы компаний Atlas Copco, которая является лидером мирового рынка в сфере вакуумной техники.

Являясь частью компании-лидера, мы понимаем, что наши клиенты по всему миру рассчитывают на компанию Leybold GmbH, как на компанию, которая способна предложить технически превосходные и наиболее востребованные изделия и услуги.

Данная брошюра предназначена для предоставления краткого обзора всего спектра вакуумной техники и не зависит от ассортимента компании Leybold GmbH.

Представленные диаграммы технических характеристик вакуумных устройств и прочие данные предназначены, чтобы дать более полное представление о вакуумной технологии, и не могут быть использованы в качестве требований каких-либо обязательств с производителя.

Для нас партнерские отношения с клиентами являются одним из основных компонентов нашей корпоративной культуры. Для нас этот процесс также важен, как и постоянные инвестиции в исследования и разработки следующих поколений образцов вакуумной техники.

В течение нашей, более чем 165-летней корпоративной истории, компания Leybold GmbH сформировала для себя полноценное понимание процесса и использования накопленных знаний в области вакуумной техники. Совместно с нашими партнерами и клиентами, мы планируем продолжать наши усилия, для открытия новых применений, внедрения новых идей и разработки революционных продуктов.

Leybold GmbH

Оглавление

Введение.....	5
1 Виды утечек.....	5
2 Величина утечки, размер течи, массовый расход газа.....	6
2.1 Стандартная гелиевая течь.....	9
2.2 Формулы для преобразования.....	9
3 Термины и определения.....	10
4 Методы обнаружения течи без гелиевого течеискателя.....	12
4.1 Проверка герметичности вакуумной системы методом повышения давления.....	12
4.2 Тест падения давления.....	13
4.3 Проверка на герметичность, с помощью газозависимых вакууметров.....	13
4.4 Пузырьковый метод.....	13
4.5 Проверка пеной.....	14
4.6 Проверка вакуумной камеры на наличие пузырьков.....	14
4.7 Проверка Криптоном 85.....	14
4.8 Высокочастотный вакуумный тестер.....	14
4.9 Проверка с помощью химических реакций и проникновения красителя.....	14
5 Течеискатели, принцип работы.....	16
5.1 Галогенный течеискатели.....	16
5.1.1 Принцип галогенного диода.....	16
5.1.2 Инфракрасный принцип (HLD 5000).....	16
5.2 Устройства для обнаружения утечек с масс-спектрометрами (МС).....	16
5.2.1 Принцип работы гелиевого масс-спектрометрического течеискателя.....	17
5.2.2 Предел измерения, фон, скопление газа в масле (газовый балласт), подавление плавающей нулевой точки.....	18
5.2.3 Калибровка течеискателей; эталонные течи.....	19
5.2.4 Течеискатели с квадрупольным масс-спектрометром.....	22
5.2.5 Течеискатель с масс-спектрометрами с секторным полем 180°.....	22
5.2.6 Прямоточные и обратно-поточные течеискатели.....	23
5.2.7 Течеискатель с разделением потока газа.....	25
5.2.8 Совместная работа с вакуумными системами.....	25
5.2.9 Постоянная времени.....	27
6 Предельные значения / технические характеристики течеискателей.....	28
7. Методики обнаружения утечки с помощью течеискателей.....	28
7.1 Вакуумный метод - методика распыления (локальное испытание на герметичность).....	28
7.2 Метод избыточного давления индикаторного газа - Методика с щупом для течеискания (локальная проверка на герметичность).....	30
7.3 Проверка суммарной утечки (испытание на герметичность).....	30
7.3.1 Проверка помещением объекта в оболочку согласно методике избыточного давления.....	30
7.3.2 Проверка помещением объекта в оболочку вакуумным методом.....	31
7.4 Испытание опрессовкой, измерение остаточного фона.....	31
9 Формулы по технике течеискания.....	33
9.1 Давление газа и единицы измерения давления.....	33
9.1.1 Парциальное давление — общее давление.....	33
9.2 Количество газа.....	34
9.2.1 Уравнение состояния для идеального газа.....	34
9.3 Газовый поток.....	34
9.3.1 Массовый расход газа.....	34
9.4 Скорость откачки.....	34

9.5 Уровень течи (величина утечки).....	34
9.5.1 Уровень течи (величина утечки) для методов повышения/падения давления.....	34
9.6 Концентрация индикаторного газа.....	34
9.6.1 Определение уровня течи при снижении концентрации индикаторного газа.....	35
9.7 Зависимость потока от температуры.....	35
9.8 Зависимость утечки от давления индикаторного газа.....	35
9.9 Изменение типа газа.....	35
9.10 Перевод утечки жидкости в газовую утечку.....	36
9.10.1 Константа вещества с.....	37
9.11 Соотношения в режиме разделения потока.....	37
9.11.1 Время отклика.....	37
9.12 Время откачки	37
9.12.1 Необходимая скорость откачки.....	38
9.13 Преобразование единиц измерения давления.....	38
9.14 Преобразование единиц измерения потока газа, утечки.....	39
9.15 Преобразование Англо-Американских единиц измерения.....	40
9.16 Преобразование единиц измерения температуры.....	41
9.17 Сравнение шкал температур.....	42
9.18 Основные газовые законы и зависимости.....	43

Введение

В дополнение к существующим вакуумным системам и их отдельным компонентам (вакуумная камера, линии, клапаны, измерительные приборы и др.) существует множество систем и изделий в промышленности и научно-исследовательской деятельности, к которым предъявляются высокие требования по параметру герметичность, обычно используют термин изделия с нормированной герметичностью. К таким изделиям, например, относятся, в частности, узлы системы кондиционирования автомобилей, контуры холодильных машин.

Такие частые общие заявления как, например, «скрытые утечки» или «нулевая утечка», не имеют под собой достаточно оснований для одобрения результатов приемочных испытаний. Каждый технический специалист понимает, что правильно вычисленные допустимые технические требования на практике будут обозначать определенную величину утечки при определенных условиях.

Кроме того, уровень допустимой утечки определяется конкретным применением.

1 Виды утечек

Приведем простое определение термина «утечка» следующее: Утечка - это «отверстие»(щель) в разделительной перегородке, через которое твердые вещества, жидкости или газы могут нежелательным образом входить или выходить.

В зависимости от типа материала или нарушения соединения, разделяют следующие виды утечек:

- Утечки в разъемных соединениях:

Фланцы, соприкасающиеся поверхности, кожуха

- Утечки в неподвижных соединениях:

Паяльные и сварочные швы, клеевые соединения

- Утечки из-за пористости:

Особенно после механической деформации (например изгиба) или термической обработки поликристаллических материалов и литых компонентов

- Термические течи:

Открывающиеся при высокой тепловой нагрузке (тепло/холод), прежде всего на паяльных швах.

- Очевидные (визуальные) утечки:

Утечки количества газа, высвобождаемого из пустот и полостей внутри литых деталей, глухих отверстий и соединений (в том числе из-за испарения жидкостей).

- Косвенные утечки (натекания):

натекания из подводных подводных трубопроводов в вакуумных системах или печах (линии подачи воды, сжатого воздуха, солевого раствора)

- «Последовательные утечки»:

Это утечка возникающая при соединении нескольких объемов например, утечка в заполненной маслом секции масляного поддона в пластинато-роторном вакуумном насосе.

- «Односторонние утечки»:

Газ проходит только в одном направлении, но утечки непроницаемы в другом направлении (редко встречаются)

Стенка, которая является не является абсолютно газонепроницаемой, и для которой наличие утечки не является дефектом называется проницаемой.

- Проницаемость

Естественная проницаемость газа через материалы, такие как резиновые шланги, уплотнения из эластомера и т.д. (если только эти части не станут хрупкими и, таким образом, «дающими утечку»).

2 Величина утечки, размер течи, массовый расход газа

Ни одно вакуумное устройство или система не может быть абсолютно вакуумно-непроницаемым, в этом нет ничего плохого, этого на самом деле не нужно. Основным моментом будет является то, что интенсивность утечки должна быть настолько низкой (относительно быстроты действия средств откачки), чтобы не влиять на требуемое рабочее давление, газовый баланс и предельное остаточное давление в вакуумной камере. Отсюда следует, что чем **требования в отношении газонепроницаемости вакуумной системы более высокие, тем ниже будет уровень давления вакуума, которые возможно будет получить.**

Для того, чтобы иметь возможность регистрировать утечки количественно, было введено понятие «**величины течи**»(натекание) с **условным обозначением q_L и единицей измерения мбар· л/сек.**

О течи с натеканием $q_L = 1$ мбар· л/сек говорят, когда в изолированном объеме, с давлением ниже атмосферного, давление повышается на 1 мбар в секунду или если присутствует избыточное давление, давление падает на 1 мбар.

Интенсивность утечки из сосуда показывает величину расхода газа, который выходит наружу через стенки сосуда. **Следует отметить, однако, что интенсивность утечки зависит от типа газа.**

Если температура газа T и молярная масса M газа G известна, массовый расход газа может быть вычислен по интенсивности утечки q_L используя уравнение состояния для идеальных газов через соотношение

(1) $\Delta m / \Delta t = (q_L \cdot M) / (R \cdot T)$ Единица измерения: г/с , где

$R = 83.14$ (мбар·л) / (моль·К)

T = температура газа в К

M = молярная масса в г/моль

Δm = масса в г

Δt = временной интервал в сек.

Соотношение (1) используется для того, чтобы:

а) определить массовый расход $\Delta m / \Delta t$ при известной интенсивности утечки q_L (в данном контексте, смотрите пример в 4.1) или

б) определить интенсивность утечки q_L при известном массовом расходе газа $\Delta m / \Delta t$ (Смотрите пример ниже).

Пример для б):

Система охлаждения, использующая охлаждающий агент R134a (= фреон), имеет потерю охлаждающего агента 1 г в год при 25°C. Насколько велика утечка фреона q_L ?

При $T = (273 + 25) \text{ K} = 298 \text{ K}$ и $M (\text{R134a}) = 102,03 \text{ г/моль}$, скорость утечки фреона - q_L (фреон) = $6,5 \cdot 10^{-6}$ мбар·л/сек в соответствии с (1).

Для высоковакуумных систем применяется нижеследующее эмпирическое правило:

$q_L(\text{воздух}) < 10^{-6}$ мбар·л/сек = система «высоко герметична»

$q_L(\text{воздух}) < 10^{-5}$ мбар·л/сек = система «достаточно герметична»

$q_L(\text{воздух}) < 10^{-4}$ мбар·л/сек = система «с утечкой»

Фактически утечка может быть компенсирована с помощью вакуумного насоса достаточной мощности, учитывая то, что нижеследующее относится к достижимому конечному (рабочему) давлению p_{ult} :

$$(2) \quad p_{ult} = q_L / S_{eff}$$

, где

q_L = Интенсивность утечки в мбар·л/сек

S_{eff} = Действующая скорость вакуумирования вакуумного насоса в вакуумном резервуаре, в л/с.

То есть если есть возможность достаточно увеличивать S_{eff} , то всегда можно достичь заданного конечного (рабочего) давления независимо от интенсивности утечки q_L .

На практике, однако, желаемое увеличение S_{eff} не может быть осуществимо из-за экономических и конструктивных причин (чрезмерно высокие затраты, большая потребность в площади).

Если в вакуумной системе не достигается требуемое конечное давление, то говорят о двух распространенных причинах этого:

1 наличие утечек

и/или

2. выход (десорбция) газа через стенки сосуда и газация материала уплотнения.

Для того, чтобы разграничить эти две причины можно использовать анализ методом парциального давления с масс-спектрометром или проверку нарастания давления с течением времени. Поскольку с помощью проверки герметичности вакуумной системы по возрастанию давления возможно определить только наличие утечки, а не ее положение в системе, рекомендуется использовать течеискатель утечки гелия, который позволяет локализовать утечки.

Чтобы получить общее представление о соотношении между геометрическим размером отверстия и соответствующей интенсивностью утечки, можно оперировать на основе нижеследующей, грубой оценки:

Круглое отверстие диаметром $D = 1$ см в стенке вакуумного резервуара закрывается с помощью клапана. Снаружи присутствует атмосферное давление ($p = 1013$ мбар), вакуум находится внутри. Когда клапан открыт, воздух течет со скоростью звука ($V_s = 330$ м/с) через поперечное сечение отверстия $A = \pi \cdot (D^2 / 4) \approx 0,79$ см² в резервуаре. Количество воздуха, поступающего в резервуар, составляет $q_L(\text{воздух}) = p \cdot V_s \cdot A \approx 2,6 \cdot 10^4$ мбар*л/сек.

В случае с гелием, при всех прочих равных условиях, гелий протекать через отверстие при скорости звука 970 м/с, тогда интенсивность утечки гелия q_L (гелий) составляет $\approx 7,7 \cdot 10^4$ мбар * л/сек, таким образом интенсивность утечки выше.

Большая «чувствительность» гелия используется для обнаружения утечек, и привела к развитию и массовому производству высокочувствительных устройств по определению потока гелия для обнаружения утечек (смотрите Раздел 5.2).

На Рис. 1 показана корреляция между размером отверстия и интенсивностью утечки воздуха, с приближенным значением q_L (воздуха) = 104 мбар*л/сек для «отверстия диаметром 1 см».

Из таблицы видно, что, когда диаметр отверстия D уменьшается до 1 мкм = 0,001 мм (= уменьшение D на коэффициент 10000) интенсивность утечки составит $1,0 \cdot 10^{-4}$ мбар*л/сек, значение, которое в вакуумной технике уже представляет собой серьезную утечку (смотрите, представленное выше, эмпирическое правило).

Интенсивность утечки $1,0 \cdot 10^{-12}$ мбар-л/сек соответствует диаметру отверстия 1 Ангстрем (А);

это - нижний предел чувствительности современных гелиевых устройств обнаружения утечек. Поскольку константы решетки многих твердых веществ составляют несколько А, а диаметры меньших молекул (H_2 , He) около 1 А, внутренняя проницаемость сквозь твердые вещества может быть зарегистрирована с использованием гелиевых устройств обнаружения утечек. Это привело к разработке калиброванных проверок утечек с очень малыми интенсивностями утечек. Это в известной мере «отсутствие герметичности», а не «утечки» в смысле присутствия дефекта в материале или соединении.

Соотношение между диаметром отверстия и величиной утечки для воздуха

$p = 1013$ мбар, диаметр отверстия $D = 1$ см

Скорость газа = скорость звука в воздухе = 330 м/с

$$330 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{1^2 \cdot \pi}{4} \cdot \text{см}^2 = 26 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^3}{\text{с}} = 26 \frac{\ell}{\text{с}}$$

Объем / секунда:

$$1013 \text{ мбар} \cdot 26 \frac{\ell}{\text{с}} = 2,6 \cdot 10^4 \frac{\text{мбар} \cdot \ell}{\text{с}} \approx 10^4 \frac{\text{мбар} \cdot \ell}{\text{с}}$$

Количество/секунда:

Диаметр	Интенсивность утечки в мбар·л/с
10^{-2} м = 1,0 см	10^4
10^{-3} м = 1,0 мм	10^2
10^{-4} м = 0,1 мм	$10^0 (=1)$
10^{-5} м = 0,01 мм	10^{-2}
10^{-6} м = 1,0 мкм	10^{-4}
10^{-7} м = 0,1 мкм	10^{-6}
10^{-8} м = 0,01 мкм	10^{-8}
10^{-9} м = 1,0 нм	10^{-10}
10^{-10} м = 1,0 Ангстрем	10^{-12} (Предел чувствительности гелиевых течеискателей)

Рис. 1: Соотношение между диаметром отверстия и интенсивностью утечки, оценка на воздухе

Оценки или измерения размеров атомов, молекул, вирусов, бактерий и т.д. часто давали начало использованию повседневных терминов, таких как, например, «водонепроницаемый» или «непроницаемый для бактерий» (смотрите **Таблицу 1**).

Концепт /Критерий	Пояснение	q_L (мбар·л/сек)	Соответствующий размер частицы
Водонепроницаемый ^{*)}	Капли	$< 10^{-2}$	
Паронепроницаемый	«Выпотевание»	$< 10^{-3}$	
Непроницаемый для бактерий ^{*)} (кокки) (палочкообразные)		$< 10^{-4}$	$\varnothing = 1$ п.м $\varnothing = 0,5 - 1$ мкм, 2 - 10 мкм
Маслонепроницаемый		$< 10^{-5}$	
Непроницаемый для вирусов ^{*)} (вакцины, например, болезни с высыпаниями на коже) (мелкие вирусы, бактериофаги) (вириды, РНК)		$< 10^{-6}$ $< 10^{-8}$ $< 10^{-10}$	
Газонепроницаемый		$< 10^{-7}$	
«Абсолютно не проницаемый»	Технические	$< 10^{-10}$	

^{*)} В отличие от паровой фазы, необходимо проводить различие между гидрофильными и гидрофобными твердыми веществами. Это также относится к бактериям и вирусам, поскольку они транспортируются в основном в растворах.

Таблица 1: Соотношение между критериями герметичности и интенсивностью утечки q_L

На Рис. 2 представлены пределы обнаружения часто используемых методов обнаружения утечек

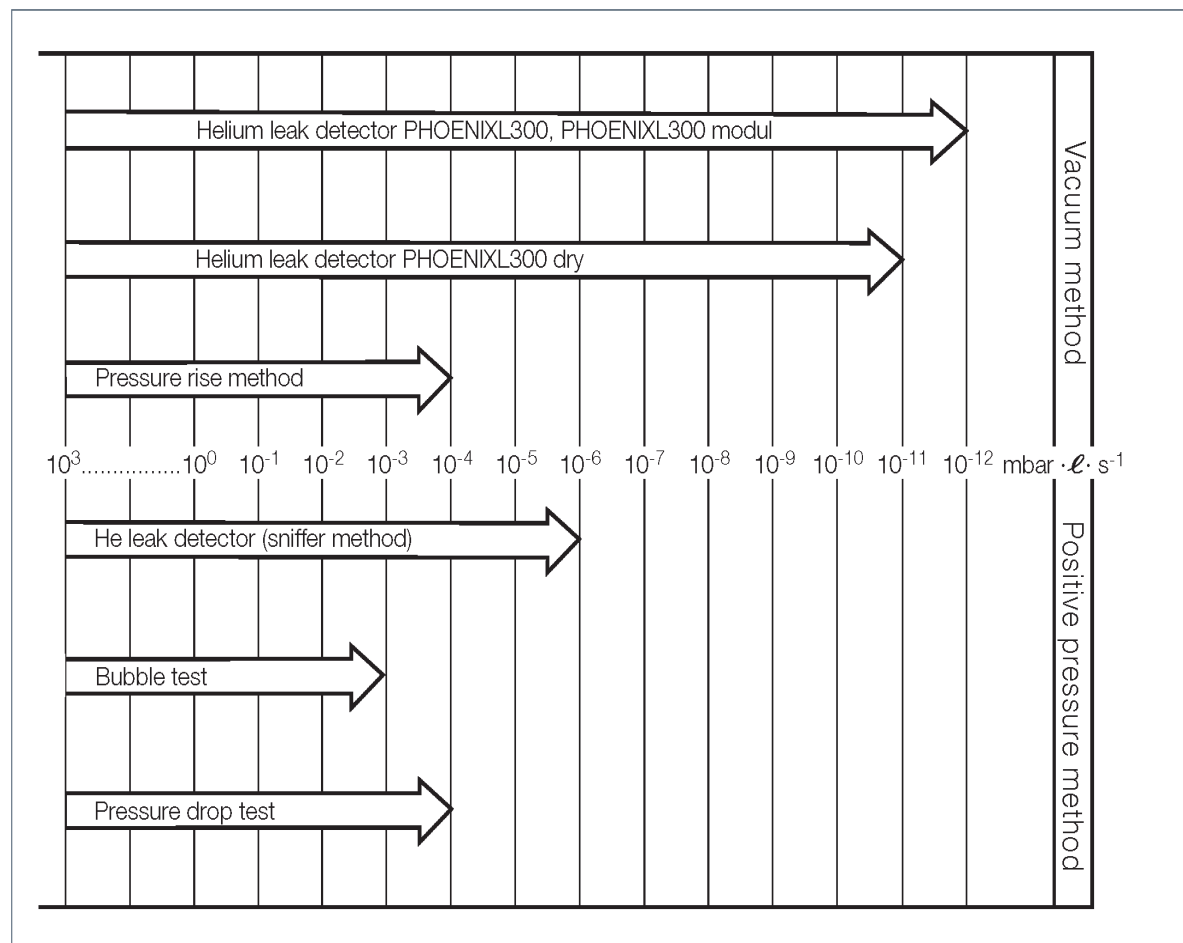


Рис. 2: Характерные пределы обнаружения часто используемых методов обнаружения утечек.

2.1 Стандартная гелиевая течь

Необходимыми параметрами для однозначного определения утечки являются давление, преобладающие на стороне стенки сосуда и свойство среды, проходящей через эту стенку (вязкость, молярная масса). Для случая, когда испытание проводят с гелием ⁴ при перепаде давления 1 бар от атмосферного давления (внешнего) до вакуума ($p < 1$ мбар, внутреннего), которое часто встречается на

практике, название «стандартная гелиевая течь» было введено в стандарте DIN EN 1330-8. Для того, чтобы определить годность изделий при с использованием гелия сравнивая со стандартной гелиевой течью, необходимо сначала пересчитать реальные условия испытания на стандартные условия (смотрите 2.2). Некоторые примеры таких преобразований показаны на Рис.3

Утечка	Количество вещества, проходящего в единицу времени через отверстие	Стандартные условия для гелия: $P_1 = 1$ бар, $p_2 < 1$ мбар ($\Delta p = 1$ бар) индикаторный газ = Гелий
↓	↓	↓
Известные утечки:	Вытекающее количество вещества:	Стандартная гелиевая течь (He):
Капание водовыпускного крана 4 мм Ø, 1Гц, $\Delta p = 4$ бар	34 мг/с по воде=6,45 мбар·л/с по воздуху	0,17 мбар·л/с
Волосок лежит на уплотнении	10^{-2} мбар·л/с по воздуху	$0,9 \cdot 10^{-2}$ мбар·л/с
Велосипедная камера в воде (проба на образование пузырей) 2мм Ø, 1Гц, $\Delta p = 0,1$ бар	$4,19 \cdot 10^{-2}$ нсм ³ /с= $4,24 \cdot 10^{-3}$ мбар·л/с по воздуху	$1,88 \cdot 10^{-2}$ мбар·л/с
Автопокрышка теряет воздух 25л за 6 месяцев: 1,8 ≥ 1,6 бар	$3,18 \cdot 10^{-4}$ мбар·л/с по воздуху	$4,3 \cdot 10^{-5}$ мбар·л/с

Рис. 3: Примеры преобразования величин реальных течей в стандартные гелиевые течи.

2.2 Формулы для преобразования

Что касается преобразования давления и типа газа (вязкость, молярная масса), следует отметить, что к ламинарным (вязким) и молекулярным потокам. Граница между этими областями не является явной. Можно допустить нижеследующее: при скорости утечки
 $q_L > 10^{-4}$ мбар·л/сек ламинарный режим
 $q_L < 10^{-6}$ мбар·л/сек молекулярный режим

Для переходного режима мы рекомендуем принимать значения с запасом.

Зависимости указаны в Таблице 2.

В данном случае индексы «I» и «II» относятся к перепадам давлений, а индексы «1» и «2» - внутренняя и наружная стороны точки утечки. Давление p_1 всегда должно быть выше давления p_2 ($p_1 > p_2$).

Поток	Ламинарный	Молекулярный
Давление	$q_1 \cdot (P_1^2 - P_2^2)_{II} = q_{II} \cdot (P_1^2 - P_2^2)_I$	$q_I \cdot (p_1 - p_2)_{II} = q_{II} \cdot (p_1 - p_2)_I$
Тип газа	$q_{газA} \cdot \eta_{газA} = q_{газB} \cdot \eta_{газB}$	$q_{газA} \cdot (M_{газA})^{0,5} = q_{газB} \cdot (M_{газB})^{0,5}$

Таблица 2: Зависимости для давления и свойств газа, p = давление, q = расход газа (интенсивность утечки), η = вязкость, M = молярная масса

3 Термины и определения

При поиске утечек, как правило, необходимо различать две задачи:

1. Локализация утечек

2. Определение величины утечек

Также принято различать в зависимости от метода поиска

а. Вакуумный метод

(Иногда известного как «утечка снаружи вовнутрь») Поток гелия идет в объект испытаний; давление внутри объекта испытаний меньше, чем давление окружающей среды

б. Методом избыточного давления

(Также известный как «утечка изнутри наружу») поток гелия выходит из объекта испытаний наружу; давление внутри объекта испытаний выше, чем давление вне объекта.

Проверяемые объекты должны по возможности проверяться так, как они будут эксплуатироваться, то есть компоненты, работающие под вакуумом, лучше проверять вакуумным методом, а компоненты работающие под давлением — методом избыточного давления.

При измерении величины утечки, мы различаем

а. Величину отдельных утечек (локальное измерение), рис. 4b и 4d,

б. Суммарное натекание объекта испытаний (совокупное измерение) Рис. 4a и 4c.

Наименьшая интенсивность утечки, которая больше не является допустимой в соответствии с техническими условиями приемки, известная как **норма брака**. Ее расчет основан на том условии, что объект испытаний не может отказать в течение запланированного срока использования из-за неисправностей, вызванных утечками, и это до некоторого уровня достоверности.

Во многих случаях это не интенсивность утечки объекта испытаний, определяемая при нормальных условиях эксплуатации, а скорее пропускная способность испытательного газа при аналогичных условиях. Достигнутые значения измерения должны быть преобразованы таким образом, чтобы соответствовать ситуации использования

что касается давления внутри и снаружи объекта испытаний и типа газа (или жидкости), при обращении.

Условия, где вакуум присутствует внутри испытываемого объекта ($p < 1$ мбар), атмосферное давление снаружи, а гелий⁴ используется в испытательном газе, называются **стандартными условиям для гелия**.

Во время обнаружения утечки гелия вакуумной системы, при подключении системы к устройству обнаружения утечки, если система откачивалась до менее 1 мбар и, если он обрызгивается гелием⁴ (**метод обрызгивания**) (смотрите Рис. 4b).

Если объект испытаний откачивается исключительно с помощью устройства для обнаружения утечек, то можно было бы сказать, что **устройство для обнаружения утечек (LD) работает в прямоточном режиме**.

Если объект испытаний сам по себе является законченной вакуумной системой, со своим собственным вакуумным насосом и, если устройство для обнаружения утечки работает параллельно с насосами системы, он относится к **режиму частичного расхода устройства для обнаружения утечки**. Он также относится к режиму частичного расхода тогда, когда отдельный вспомогательный насос используется параллельно с устройством для обнаружения утечек.

Метод избыточного давления иногда может быть непрактичным, или фактически невозможным для измерения величины натекания напрямую, в то время как это, безусловно, может быть измерено в оболочке, содержащем испытываемый образец. Измерение может быть сделано путем подключения этого корпуса к устройству для обнаружения утечки или путем накопления (увеличения концентрации гелия в объеме) тестового газа внутри корпуса (смотрите Рис. 4c). Измерение пиков гелия представляет собой специальную версию теста накопления уровня гелия (смотрите Раздел 7.4).

Методику течеискания с щупом можно рассматривать как аналогичный вариант методики избыточного давления, индикаторный газ, выходящий из утечек, собирается специальным устройством и попадает в течеискатель (смотрите Рис. 4d). Эта процедура может выполняться при работе с гелием или хладагентами или SF₆ в качестве испытательного газа.

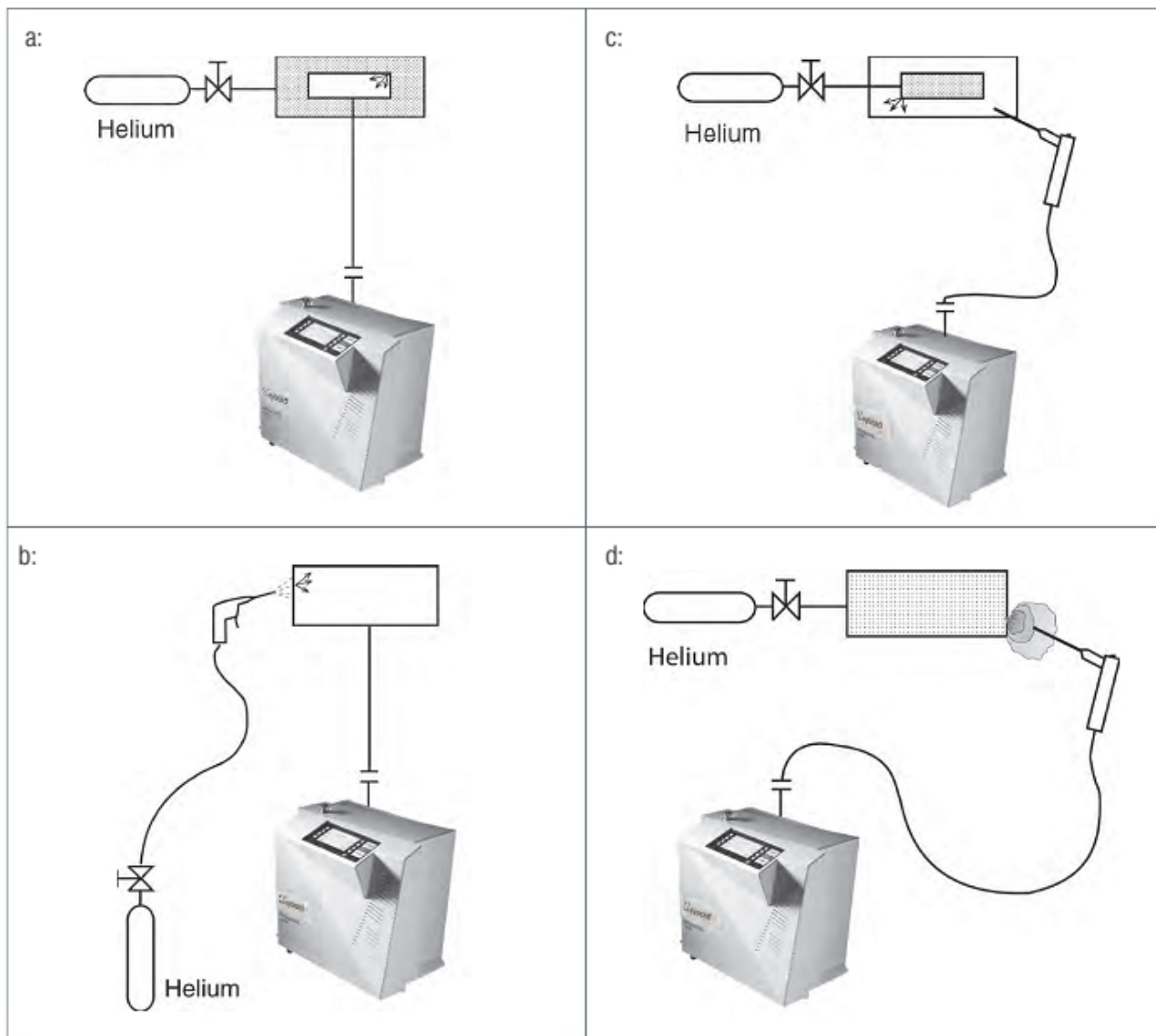


Рис. 4 Варианты использования гелиевого течеискателя, основанные на вакуумном методе (a, b) и на методе избыточного давления (c, d)

Вакуумный метод = Вакуум внутри образца	Метод избыточного давления = находящийся под давлением испытательный газ внутри образца
a: Проверка корпуса (испытание на общее натекание)	c: Проверка корпуса (испытание на суммарное натекание герметичность)
b: Методика локального обдува (локальное испытание на герметичность)	d: Методика локализации щупом (локальное испытание на герметичность)

4 Методы обнаружения течи без гелиевого течеискателя

Самым заметным различием между используемыми методами испытания, является использование или нет течеискателя.

Для простых задач утечка может быть определена качественно и количественно (величиной натекания) без помощи специальных устройств.

Например, количество воды, капающей из протекающего водопроводного крана в течение определенного периода времени может быть определено путем сбора воды с помощью мерного сосуда. В этом случае, однако, вряд ли это можно считать устройством для обнаружения утечек.

В тех случаях, когда интенсивность утечки может быть определена во процессе проверки на герметичность без использования течеискателей, эта величина утечки может быть преобразована в стандартную гелиевую течь (смотрите 2.1). Величина натекания по гелию часто необходима для прохождения приемосдаточных испытаний для приемки, и может быть оценена относительно величин утечки определенных гелиевым течеискателем.

Несмотря на тщательный контроль отдельных технических компонентов, утечки могут также присутствовать в устройстве после его сборки - будь то из-за плохо установленных уплотнений или повреждения уплотнительных поверхностей. Процессы, используемые для проверки устройства зависят от размера утечек и требуемой степени герметичности, а также от того, из чего изготовлено устройство - из металла, стекла или других материалов.

Ниже вы найдете описание нескольких методов обнаружения утечек. Эти методы используются в соответствии с конкретными ситуациями применения, в то время как экономические факторы также часто играют важную роль.

4.1 Проверка герметичности вакуумной системы методом повышения давления

Этот метод проверки герметичности основывается на том факте, что из-за наличия негерметичности, в откаченный объем течение определенного периода времени. Также идет процесс дегазации газа со стенок и уплотнений, который, уменьшается с течением времени.

Для начала проверки закрывается клапан между камерой и насосной системой. Далее начинается измеряется время Δt , в течение которого давление повышается на

Если становится ясным, что повышение

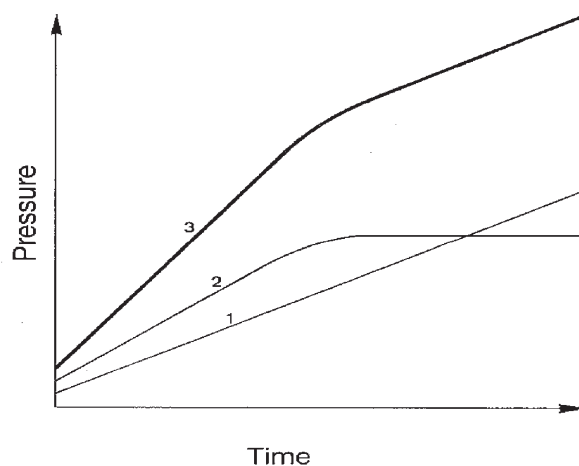
определенную величину Δp (на один порядок, например). Далее камеру откачивают вновь (открывают клапан) и повторно проводят тест. Если время Δt суммарного повышения давления Δp остается постоянным, то присутствует утечка, если предположить, что период ожидания между двумя измерениями повышения давления был достаточно продолжительным. Соответствующая продолжительность периода ожидания зависит от особенности и размера проверяемого объема. Если время повышения давления Δp увеличивается, то этот эффект скорее всего вызван снижением дегазации газа со стенок.

Можно также попытаться провести различие между утечками и загрязнением путем интерпретации кривой, отображающей повышение давления (= давление в зависимости от времени).

Нанесенная на график с линейными шкалами, кривая повышения давления должна быть прямой линией в том месте, где имеется утечка, даже при более высоких давлениях.

Если повышение давления происходит из-за высвобождения газа, через стенки, тогда повышение давления будет постепенно уменьшаться и приближаться к окончательному и стабильному значению. В большинстве случаев оба эти явления будут происходить одновременно в силу того, что разделение двух факторов зачастую бывает трудным, если не невозможным.

Эти отношения схематически показаны на рис. 5.



- 1 Утечки (натекания)
- 2 Дегазация стенок
- 3 Суммарная утечка + дегазация

Рис. 5: Повышение давления в вакуумном контейнере, как функция времени после выключения вакуумного насоса

соединительные компоненты, используемые в

давления связано исключительно с негерметичностью, тогда может быть определена скорость натекания используя следующую зависимость:

$$(3) q_L = V \cdot (\Delta p / \Delta t)$$

, где

q_L = натекание утечки в мбар·л/сек

V = Объем вакуумного резервуара в л.

$\Delta p / \Delta t$ = отношение разности давления в вакуумном резервуаре Δp , деленное на время измерения Δt в мбар/с

Пример:

После закрытия клапана со стороны насоса, давление p в вакуумном сосуде объемом $V = 20$ л возрастает от $1 \cdot 10^{-4}$ мбар до 10^{-3} мбар через $t = 300$ сек. Таким образом, $\Delta p = (1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4})$ мбар = $9 \cdot 10^{-4}$ мбар и скорость натекания (негерметичность) для воздуха в соответствии с соотношением (3) $q_L(\text{воздух}) = V (\Delta p / t) = 6 \cdot 10^{-5}$ мбар·л/сек.

из соотношения (1), получаем массовый расход газа $\Delta m / \Delta t$ через негерметичность $q_L = 6 \cdot 10^{-5}$ мбар·л/сек:

$$\Delta m / \Delta t = 7 \cdot 10^{-8} \text{ г/сек}$$

(Температура $T = 293$ К, молярная масса воздуха $M \approx 29$ г/моль)

Если объем вакуумируется с помощью турбомолекулярного насоса TURBOVAC 50, например, (скорость откачки $S = 50$ л/с), который прикреплен к вакуумной камере с помощью запорного клапана, то можно ожидать эффективную скорость откачки приблизительно $S_{\text{eff}} = 30$ л/с. Таким образом, конечное давление будет

$$p_{\text{ult}} = q_L / S_{\text{eff}} = (6 \cdot 10^{-5} \text{ мбар·л/сек}) / (30 \text{ л/сек}) = 2 \cdot 10^{-6} \text{ мбар}$$

Предельное остаточное давление возможно снизить, используя насос большей производительности (например, TURBOVAC 151).

4.2 Тест падения давления

Метод аналогичен тесту повышения давления. Хотим отметить, что тест понижения давления довольно редко используется для проверки вакуумных систем. Если всё-таки данный метод используется, то избыточное давление не должно превышать 1 бар, вакуумные соединения, не смогут выдерживать высоких (более 1 бар) давлений. С другой стороны, тест на падение давления, это наиболее распространенный метод проверки герметичных объемов.

При работе с большими контейнерами и соответственно при продолжительных периодах измерений, необходимо, при проведении данного метода, учитывать влияние изменений температуры. Важно влияние может оказать процесс конденсации водяного пара при охлаждении и снижении давления, такое измерение не позволит вычислить поток натекания.

4.3 Проверка на герметичность, с помощью газозависимых вакууметров

Тот факт, что показание давления мановакууметрах чувствительно к изучаемому виду газа, можно в определенной степени использовать с целью обнаружения утечек. Таким образом, можно нанести щечкой или распылителем спирт на места предполагаемых утечек. Пар спирт, который поступает в устройство изменяет показания давления мановакуумметра, поскольку теплопроводность и ионизируемость паров спирта в значительной степени отличаются от тех же свойств воздуха. Наличие более точных, удобных в использовании гелиевых устройств для обнаружения утечек, подтверждает тот факт, что этот метод почти полностью устарел.

4.4 Пузырьковый метод

Находящийся под давлением образец погружается в ванну с жидкостью. Поднимающиеся на поверхность пузырьки газа указывают на наличие утечек.

Обнаружение утечек зависит в значительной степени от осведомленности инспектирующего лица и вызывает желание увеличить «чувствительность», используя все более и более высокие давления. Иногда, однако, это приводит к тому, что это не отображается инструкциях по технике безопасности. В случае утечек небольшой интенсивности, этот метод занимает очень много времени (смотри таблицу 3). Таблица 3 относится к испытанию на герметичность холодильных систем, которые эксплуатируются с охлаждающим агентом R134a. Для таких систем, интенсивность утечки указывается в граммах потери охлаждающего агента за год (г/г). Масла на водяной или нефтяной основе используются в качестве испытываемой жидкости (которая может нагреваться или к которой можно добавить поверхностно-активное вещество) Поверхностное натяжение не должно превышать 75 дин/см (1 дин = 10^{-5} Н).

4.5 Проверка пеной

Во многих случаях находящиеся под давлением контейнеры или газовые линии (включая линии подачи газа для вакуумных систем) можно проверить достаточно удобно на предмет утечек путем нанесения кистью или распылением раствора поверхностно-активного вещества на места предполагаемых утечек. Также в продаже имеются соответствующие спреи для обнаружения утечек. Выходящий газ образует мыльные пузыри в местах утечек. В данном случае, опять же, обнаружение небольших утечек забирает много времени и будет в значительной степени зависеть от внимательности инспектора.

Системы охлаждения газообразного водорода, используемые в генераторах электростанции представляют собой особый случай. Они действительно иногда испытываются способом, описанным выше, но они могут быть проверены гораздо лучше, и при значительно более высокой чувствительности посредством засасывания водорода, выделяющегося в местах утечек с помощью гелиевого устройства для определения утечек, которое было скорректировано, чтобы реагировать на (H₂).

4.6 Проверка вакуумной камеры на наличие пузырьков

В качестве варианта испытания распылением упомянутого выше, в котором выходящий газ вызывает образование пузырей, можно разместить исследуемую так называемую «вакуумную камеру» с уплотнением (что-то вроде очков водолаза) на поверхности, после опрыскивания ее раствором мыла. Данная камера затем вакуумируется с помощью вакуумного насоса. Воздух, проходящий через места нарушения герметичности вызывает образование пузырьков внутри камеры, которые можно наблюдать через стеклянное окошко в камере. Таким способом можно также, например, инспектировать плоские листовые металлические пластины на предмет наличия герметичности. Имеются вакуумные камеры для различных сфер применения, изготовленные, чтобы удовлетворять требованиям разнообразного ассортимента поверхностных контуров.

4.7 Проверка Криптоном 85

При работе с небольшими, герметически закрытыми комплектующими, при негерметичном корпусе, криптон 85, газообразный, радиоактивный изотоп, вначале принудительно подается в устройство,

прикладывая давление извне. Как только точно измеренный период удержания истечет, давление будет сброшено, узел продут и будет измерена активность устройства для заправки газом.

Таким же образом можно также использовать гелий в качестве испытательного газа.

4.8 Высокочастотный вакуумный тестер

Так называемый высокочастотный вакуумный тестер может быть использован не только для проверки давления в лабораторных стеклянных приборах, но также, чтобы определить местонахождение пористых участков в пластиковых и лакокрасочных покрытиях на металлах. Он представляет собой переносной блок с похожим на щетку высокочастотным электродом и блоком питания. Форма и цвет электрического газового разряда может служить приблизительным показателем давления, преобладающего внутри стеклянного прибора. Что касается вакуумного тестера - который включает в первую очередь трансформатор тесла (который подает высокое напряжение, переменный ток высокой частоты) - коронирующий электрод, приближаясь к устройству, будет запускать безэлектродный разряд внутри устройства. Интенсивность и цвет этого разряда будут зависеть от давления и типа газа. Эффект светового разряда позволяет сделать выводы относительно приближенного значения давления, преобладающего внутри устройства. Видимость разряда будет исчезать при высоких и низких давлениях.

При поиске утечек в стеклянных приборах подозрительные участки будут отсканированы или прослежены с помощью электрода высокочастотного вакуумного тестера. Там, где есть утечка дуга будет пробивать пору в стеклянной стенке, трассируя ярко светящийся след разряда. Небольшие поры могут быть увеличены с помощью этих искр. Коронный разряд вакуумного тестера может также пронизывать тонкие участки в стекле, особенно в сварных точках и переходных зонах между переходными компонентами. Оборудование, которое было первоначально без утечек может стать негерметичным таким способом! В отличие от современных устройств для обнаружения утечек высокочастотный вакуумный тестер сильно ограничен в своем функционировании.

4.9 Проверка с помощью химических реакций и проникновения красителя

Подчас утечки кроме того можно определить или обнаружить с помощью химических

реакций, которые приводят к изменению цвета или путем проникновения раствора красителя в мелкие отверстия.

В прошлом, изменение цвета пламени из-за газообразного галогена, выходящего через места нарушения герметичности использовалась для определения утечек в паяных соединениях холодильных установок.

Пример испытания на проникновение красителя представляет собой проверку герметичности резиновых втулок или плунжеров в стеклянных

трубках, используемых, например, в испытании пригодности материалов для одноразовых шприцев или фармацевтических упаковок.

При оценке крошечных утечек жидкостей необходимо будет рассмотреть вопрос о смачиваемости поверхности твердого тела и капиллярном действии. Некоторые, широко используемые методы обнаружения утечек приведены, вместе с испытательным газом, областью применения и их особенностями, в **Таблице 4.**

Потеря холодильного агента R134a в год	Эквивалентная интенсивность утечки R134a при 25°C	Время для 10 пузырьков газа, Ø 2 мм	Время обнаружения, при использовании устройства для обнаружения утечки гелия
г/год	мбар·л/с	сек.	сек.
430	$3,32 \cdot 10^{-3}$	3.2	несколько секунд
86	$6,63 \cdot 10^{-4}$	15.8	несколько секунд
21,5	$1,66 \cdot 10^{-4}$	63.1	несколько секунд
17,2	$1,33 \cdot 10^{-4}$	1 мин. 48 сек.	несколько секунд
4,3	$3,32 \cdot 10^{-5}$	5 мин. 15 сек.	несколько секунд
0,86	$6,63 \cdot 10^{-6}$	26 мин. 19 сек.	несколько секунд
0,1 *)	$7,70 \cdot 10^{-7}$	3 часа 46 минут	несколько секунд

*) Эта интенсивность утечки представляет собой предел обнаружения хороших галогенных устройств для обнаружения течей ($\approx 0,1$ г/г (граммов в год)).

Таблица 3: Сравнение пузырькового метода с методом течеискателем гелия.

Метод	Испытательный газ	Наименьшая обнаруживаемая интенсивность утечки		Диапазон давлений	Количественное измерение
		мбар·л/с	R134a г/год		
Индикация пенящимися жидкостями	Воздух и другие газы	10 ⁻⁴	7·10 ⁻¹	Положительное давление	Нет
Ультразвуковой метод	Воздух и другие газы	10 ⁻²	70	Положительное давление	Нет
Тепловой течеискатель	Другие газы, за исключением воздуха	10 ⁻³ -10 ⁻⁵	7·10 ⁻¹	Положительное давление и вакуум	Нет
Галогенное течеискатели	Вещества, содержащие галогены	10 ⁻⁶ (10 ⁻⁵)	10 ⁻¹ (10 ⁻¹)	Положительное давление (Вакуум)	С ограничениями
Универсальные щуповые течеискателя	Хладагент, гелий и другие газы	10 ⁻⁶	10 ⁻¹	Положительное давление	Да
Гелиевый течеискатель	Гелий	10 ⁻¹² 10 ⁻⁷	7·10 ⁻⁹ 7·10 ⁻⁴	Вакуум Положительное давление	Да
Пузырьковый метод	Воздух и другие газы	10 ⁻³	7	Положительное давление	Нет
Гидравлические испытания	Вода	10 ⁻²	70	Положительное давление	Нет
Метод падения давления	Воздух и другие газы	10 ⁻⁴	7·10 ⁻¹	Положительное давление	Да
Проверка вакуумной системы методом повышения давления	Воздух	10 ⁻⁴	7·10 ⁻¹	Вакуум	Да

Таблица 4: Сравнение наиболее важных методов обнаружения утечек

5 Течеискатели, принцип работы

Сегодня большинство проверок герметичности осуществляется с помощью специальных устройств обнаружения утечек. Они могут обнаруживать утечки гораздо более низкой интенсивности, нежели методы, которые не используют специальное оборудование.

Функция большинства устройств для обнаружения утечек основана на том, что тестирование проводится с помощью специального испытательного газа, т.е. со средой, отличной от той, которая используется в обычных условиях эксплуатации.

Гелий 4, который обнаруживается масс-спектрометром часто используется в качестве испытательного газа для обнаружения утечек. Таким образом, например, испытуемый объект может быть кардиостимулятор, внутри которого компоненты должны быть защищены от проникновения физиологических жидкостей во время обычной работы.

Данный пример сам по себе проясняет то, что необходимо принимать во внимание различные свойства применения и рабочие среды.

5.1 Галогенный течеискатели

5.1.1 Принцип галогенного диода

Газообразные химические соединения, молекулы которых содержат хлор и/или фтор - такие, как охлаждающие агенты: R12, R22 и R134a - будут влиять на выбросы щелочных ионов с поверхности, пропитанной смесью КОН и гидроксидом железа (III) и поддерживаются на уровне при температуре 800°C - 900°C с помощью внешнего нагревателя Pt. Освобожденные ионы текут к катоду, где измеряется ионный ток, после чего усиливается (галогенный диодный принцип). Этот эффект является настолько значительным, что парциальное давление галогенов может быть измерено вплоть до $1 \cdot 10^{-7}$ мбар.

Ранее данные приборы использовались для вакуумного метода, но из-за ограничений в обращении с ХФУ (хлорфторуглеводородами) — сейчас это только щуповые приборы. Достижимый предел обнаружения составляет около $1 \cdot 10^{-6}$ мбар·л/сек для всех устройств.

Оборудование на основе принципа галогенного диода может детектировать эндогаз SF₆. Соответственно, данные течеискатели широко применяются течи хладагента или эндогаза.

5.1.2 Инфракрасный принцип (HLD 5000)

В качестве примера приведен прибор HLD 5000 (HLD 6000), который использует физические свойства молекул, способных поглощать

инфракрасное излучение. Испытательный газ, который попадает в линию течеискателя, проходит через излучатель и подвергается воздействию инфракрасного излучения. Активные в инфракрасной области спектра газы (охлаждающий агент) внутри испытательного газа поглощают часть инфракрасного излучения и, таким образом, изменяют первичный инфракрасный сигнал. Измененный инфракрасный сигнал обнаруживается датчиком, обрабатывается, а затем отображается. Предел обнаружения - порядка $5 \cdot 10^{-5}$ мбар·л/сек. Из-за непрерывного измерения окружающего воздуха, фоновый уровень испытательного газа автоматически учитывается при расчете измеряемого значения.

5.2 Устройства для обнаружения утечек с масс-спектрометрами (МС)

Обнаружение индикаторного газа с использованием масс-спектрометров, несомненно наиболее чувствительный метод обнаружения утечек и один из наиболее широко используемых в промышленности. Устройства для обнаружения утечек с масс-спектрометрами, разработанные для этой цели, делают возможным количественное измерение интенсивностей утечки в диапазоне, перекрывающем десять порядков (см. Главу 2). Нижний предел в районе 10^{-12} мбар·л/сек. Это позволяет выполнить количественное измерение характерного газового потока через твердые вещества (проницаемость).

В принципе, с использованием масс-спектрометрии можно обнаруживать все газы. Из всех имеющихся вариантов, использование гелия 4 в качестве индикаторного газа оказалось особенно практичным, так как:

- **однозначно обнаруживается с помощью масс-спектрометра**
- **химически инертный**
- **не взрывоопасен**
- **не токсичен**
- **присутствует в обычном воздухе в концентрации лишь 5 ppm (= $5 \cdot 10^{-4}$ % от объема)**

и достаточно дешевый.

В общедоступных масс-спектрометрических течеискателях используются 2 основных типа МС:

а) **квадрупольный масс-спектрометр**

и наиболее часто (благодаря своей простой конструкции).

б) **масс-спектрометр с секторным полем 180 °**

Каждый масс-спектрометр состоит из трех основных элементов:

- источника ионов,
- системы сепарации и
- ионной ловушки.

Ионы должны иметь возможность путешествовать по маршруту от источника ионов и через систему разделения в ионную ловушку, в максимально возможной степени, не сталкиваясь с молекулами газа. Этот путь составляет около 15 см для всех типов спектрометров и, таким образом, требует средней длины свободного пробега не менее 60 см, что соответствует давлению около $1 \cdot 10^{-4}$ мбар; другими словами, масс-спектрометр будет работать только в высоком вакууме. В современных устройствах для обнаружения утечек, и создания высокого вакуума используются турбомолекулярные насосы.

Для групп, связанных с отдельными дискретными элементами необходимы системы электрического и электронного питания и программное обеспечение, которое, с помощью микропроцессора, позволяет обеспечить максимально возможную степень автоматизации в последовательности операций, включая все обычные настройки и калибровки, а также индикацию измеренных значений.

5.2.1 Принцип работы гелиевого масс-спектрометрического течеискателя

На Рис. 6 приводится принцип работы устройства для обнаружения утечек с масс-спектрометром. Данный эскиз демонстрирует наиболее часто встречающуюся схему обнаружения утечек с использованием метода распыления испытательного газа (смотрите Главу 7.1) на вакуумном компоненте (= испытываемый объект).

Если газ поступает в компонент через место нарушения герметичности, он прокачивается через входное отверстие устройства для обнаружения утечек к выходному отверстию, где снова покидает устройство. Предполагая, что устройство для обнаружения утечек герметично, расход газа q всегда одинаков в любой точке между входом и выходом устройства для обнаружения утечки. Нижеследующее применяется непосредственно у отверстия откачки вакуумного насоса:

$$(4) \quad q = p \cdot S$$

p = давление откачки непосредственно у отверстия откачки вакуумного насоса, в мбар
 S = скорость откачки вакуумного насоса непосредственно у отверстия откачки вакуумного насоса в л/сек.

В любом другом положении x , применяется нижеследующее, при этом принимая во внимание потери в линии:

$$(4a) \quad q_x = q = p_x \cdot S_x$$

p_x = давление в положении x , в мбар

S_x = скорость откачки вакуумного насоса в положении x , в л/сек ($S_x < S$!).

Уравнение (4a) применяется ко всем газам, которые перекачиваются с помощью вакуумного насоса и, следовательно, также для испытательного газа TG (например, ТГ = гелий⁴). В масс-спектрометре ($x = MS$), применяется нижеследующее:

$$(4b) \quad q_{MS, TG} = q_{TG} = p_{MS, TG} \cdot S_{MS, TG} = q_L$$

$p_{MS, TG}$ = парциальное давление испытательного газа в масс-спектрометре, в мбар

$S_{MS, TG}$ = скорость откачки вакуумного насоса для испытательного газа в масс-спектрометре, в л/сек.

В этом случае расход испытательного газа q_{TG} равняется необходимой интенсивности утечки q_L . Следует отметить, что, в случае уравнения (4b), парциальное давление испытательного газа $p_{MS, TG}$ присутствует в масс-спектрометре. Измерение значения $p_{MS, TG}$ обеспечивается масс-спектрометром, который должен быть настроен на массу M испытательного газа (например, $M = 4$ для ТГ = гелий⁴). Значение $S_{MS, TG}$ - это экспериментально определенная константа каждого устройства для обнаружения утечки.

Значение $p_{MS, TG}$ предоставляемое масс-спектрометром умножается на величину $S_{MS, TG}$, которая хранится в микропроцессоре устройства для обнаружения утечки. Результат этого умножения затем отображается в виде интенсивности утечки q_L .

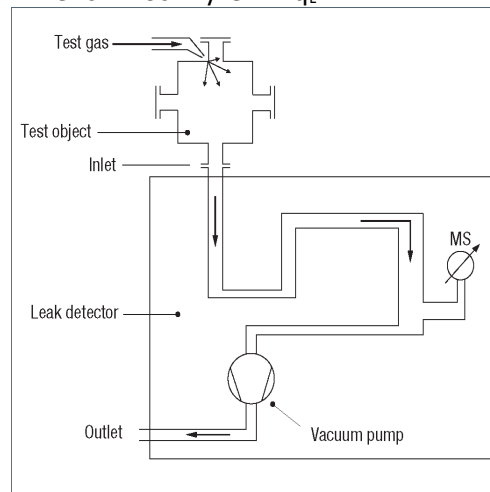


Рис. 6 Принцип работы масс-спектрометрического течеискателя (устройство для обнаружения утечек в основном потоке)

5.2.2 Предел измерения, фон, скопление газа в масле (газовый балласт), подавление плавающей нулевой точки.

Наименьшая обнаруживаемая утечка обусловлена уровнем естественного фона индикаторного газа.

Даже при закрытом входном патрубке течеискателя, индикаторный газ будет поступать в масс-спектрометр и обнаруживаться в нем, при корректной работе электронных систем.

Фоновый сигнал, генерируемый в масс-спектрометре, устанавливает **уровень обнаружения утечки прибором.**

Высоковакуумная насосная система, используемая для вакуумирования масс-спектрометра, как правило, содержит турбомолекулярный насос и маслозаполненный пластинчато-роторный насос. Как и любая жидкость, масло в центробежном роторном насосе обладает способностью испаряться и смешиваться с газом до равновесного состояния между газом, растворенным в масле и газом вне масла.

Когда насос разогревается, это состояние равновесия и является ограничивающим фактором (пределом обнаружения) для течеискателя.

Однако испытательный газ может попадать в устройства для обнаружения утечки не только через входное отверстие. Неправильная установка или неумелое обращение с индикаторным газом может дать возможность ему проникать внутрь течеискателя через клапан аэрирования и / или газобалластный клапан.

Это неизбежно приводит к более высокой концентрации индикаторного газа в масле и уплотнениях, и увеличению фонового сигнала.

Вывод: Чем больше индикаторного газа присутствует в масле, тем выше будет фоновый сигнал устройства для обнаружения утечки.

В настоящее время при общем монтаже оборудования устройство для обнаружения утечки (смотри Рис. 7), газобалластный клапан и клапан аэрирования подключаются к свежему воздуху. Выходной патрубок устройства для обнаружения утечек должен - если это возможно - быть направлен из помещения, в котором проводится испытание на герметичность. Увеличенный уровень фонового сигнала можно уменьшить еще раз, открывая газобалластный клапан и

подавая газ, который не содержит испытательный газ (например, свежий воздух).

Гелий, который хранится в масле, как бы сказать,

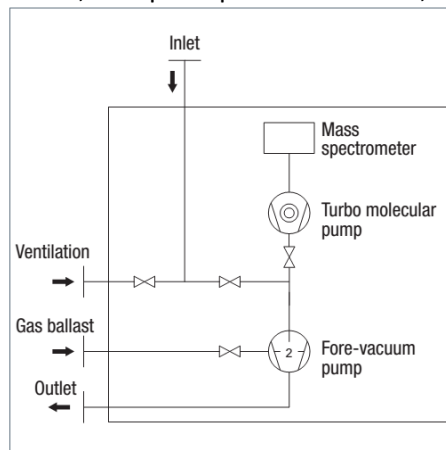


Рис. 7: Вакуумная схема противоточного устройства для обнаружения утечек

будет вымываться. Так как эффект всегда влияет только на часть масла, присутствующего в корпусе насоса, процедура промывки будет продолжаться до тех пор, пока весь запас масла в насосе не будет рециркулирован несколько раз. Как правило это занимает от 20 до 30 минут.

При использовании, так называемых «**сухих устройств для обнаружения утечек**», к которым относятся устройства для обнаружения утечек, без вакуумных насосов с масляным уплотнением, проблемы хранения газа в масле не существует. Однако, сухие устройства для обнаружения утечек, все еще должны продуваться газом, который не содержит испытательный газ, поскольку со временем испытательный газ также будет накапливаться в этих устройствах.

Для того, чтобы уберечь пользователя от неприятностей, всегда необходимо контролировать фоновый уровень и упрощать эксплуатацию устройства для обнаружения утечек, так называемое подавление плавающей нулевой точки было интегрировано в автоматические операционные концепции всех устройств обнаружения утечек компании Лейболд (смотрите Главу 5.2.5). В данном случае значение уровня фона, измеренное после того, как впускной клапан был закрыт, сохраняется, а затем автоматически вычитается из последующих измерений, после того, как клапан потом снова открывается. Только при относительно высоком пороговом уровне панель дисплея отобразит соответствующее предупреждение.

Независимо от подавления плавающей нулевой точки, устройства для обнаружения утечек компании «Лейболд» обеспечивают возможность **ручного переключения нулевой точки**. В данном случае показание на дисплее течеискателя в определенный момент будет обнулено, так что с

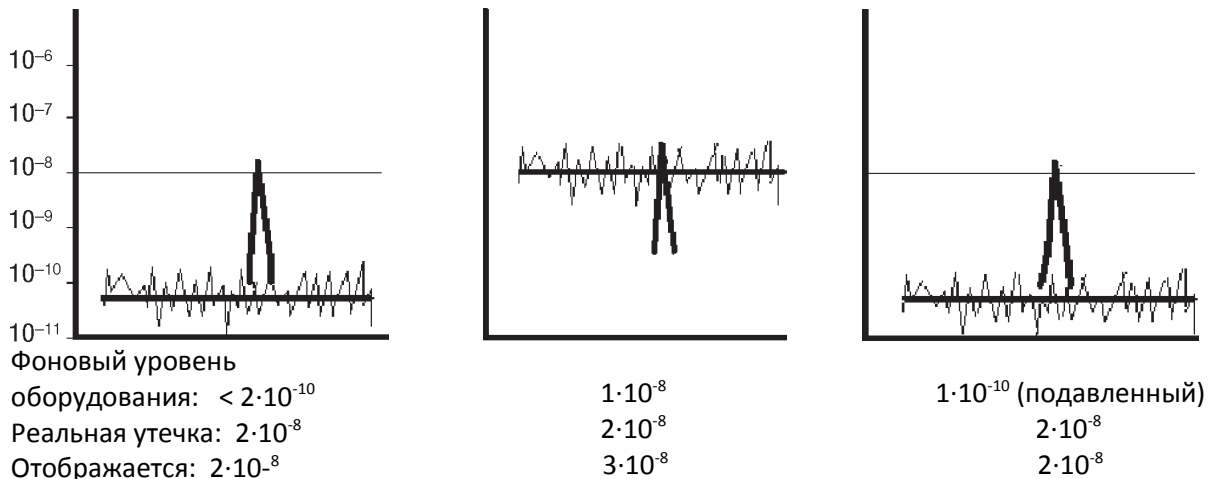


Рис. 8: Пример нулевого подавления

Показание будет увеличено только при увеличении уровня утечки. Данная функция служит лишь для облегчения чтения показаний с дисплея и не влияет на общую точность прибора.

Рис. 8 иллюстрирует действие функций ZERO

Диаграмма слева: Сигнал явно больше, чем фон.

Центральная диаграмма: увеличение фона до уровня измеряемого сигнала; сигнал не может быть отличим от фона.

Диаграмма справа: Фон подавляется с помощью функцией ZERO; измеряемый сигнал можно четко идентифицировать.

5.2.3 Калибровка течеискателей; эталонные течи

Под **калибровкой течеискателя** понимается настройка подстройка отображаемого уровня течи на дисплее течеискателя, к которому прилагается «**эталонная течь**» (или поверочная течь).

«Эталонная течь» представляет собой устройство, которое имеет постоянную утечку гелия при определенной температуре и давлении. Поток утечки отражается в сертификате калибровки «эталонной течи» и указывается на этикетке.

При течеискании вакуумным методом (метод распыления, смотрите Главу 7.1) возможно использовать два типа калибровки:

а) калибровка от внутренней течи

б) калибровка от внешней течи

Внутренняя калибровка устройства для обнаружения утечки использует эталонную течь, которая на постоянной основе встроена в устройство для обнаружения утечек. Используя эту «внутреннюю эталонную течь», только

течеискатель, в которое встроена эталонная утечка, может само себя откалибровать.

Все течеискатели компании Leybold имеют «внутреннюю калибровочную течь». С помощью автоматически управляемой процедуры калибровки, каждое устройство для обнаружения утечки может быть «внутренне откалибровано» в течение всего нескольких секунд.

Внешняя калибровка устройства обнаружения утечки использует эталонную течь, которая устанавливается на входе устройства для обнаружения утечки. Используя эту «**внешнюю эталонную течь**», устройство для обнаружения утечки может быть откалибровано за несколько минут.

Кроме того, внешняя эталонная течь может быть использована для проверки надлежащего функционирования и эксплуатации внутренней эталонной течи. В частности, внешние эталонные течи всегда используются, если необходимо откалибровать системы устройства для обнаружения утечки в собранном виде или приборы частичного расхода.

Приборы и устройства с течеискателями, как правило, также должны калиброваться с помощью «внешних эталонных течей». В этом случае необходимо убедиться в том, что с одной стороны, весь испытательный газ из эталонной течи достигает кончика течеискателя, а с другой стороны, поток газа через блок течеискателя не мешает процессу калибровки (смотри **Рис. 9**), При проведении измерений, используя методику с атмосферным щупом для течеискания (течеискатель) (смотрите Главу 7.2) также необходимо принимать во внимание расстояние от наконечника зонда к поверхности образца и скорость сканирования; они должны быть учтены в процессе калибровки. В частном случае при использовании гелия⁴

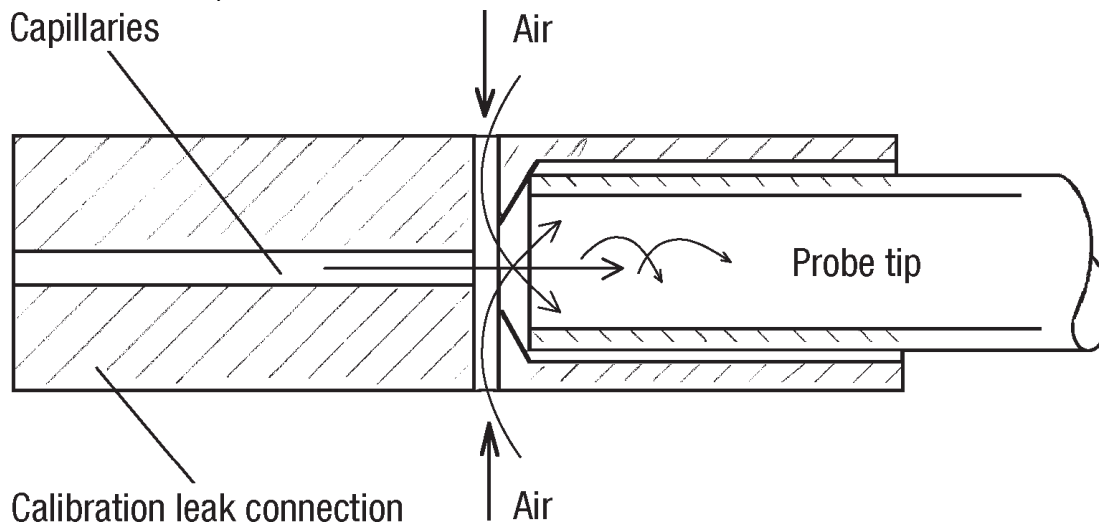


Рис. 9: Подключение для калибровки «эталонной течи» течеискателя

измеряется концентрация, калибровка может быть выполнена, используя содержание гелия в воздухе, которое одинаковое по всему миру и составляет 5 частей на миллион. «**Эталонные течи**», как правило, включают подачу газа, дроссель с определенным значением проводимости и клапан. Конфигурация будет в соответствии с необходимой интенсивностью утечки.

Рис. 10 демонстрирует различные гелиевые эталонные течи. Проникающие утечки, как правило, используются в случае, когда интенсивность утечки в диапазоне от 10^{-10} до 10^{-7} мбар-л/сек. Капилляры, как правило, используются для интенсивностей утечек в диапазоне от 10^{-7} до 10^{-4} мбар л/сек, а для утечек очень большой интенсивности в диапазоне от 10 до 1000 мбар л/сек, трубных

секций или диафрагм с точно определенными значениями проводимости.

«Эталонные течи», используемые с зарядом хладагента представляют собой особую ситуацию, поскольку хладагенты являются жидкими при комнатной температуре и обычно имеют давление пара в диапазоне от 4 бар до 10 бар. Единственная технологическая проблема, которая трудно поддается решению, опасность засорения капилляров.

Все охлаждающие агенты также являются очень хорошими растворителями масла и смазки, в связи с чем часто, очень сильно загрязняются, в связи с чем трудно заполнять эталонные течи чистым охлаждающим агентом. Решающим в данном случае считается не только химический состав, но прежде всего все растворенные частицы, которые могут повторно забивать капилляры.

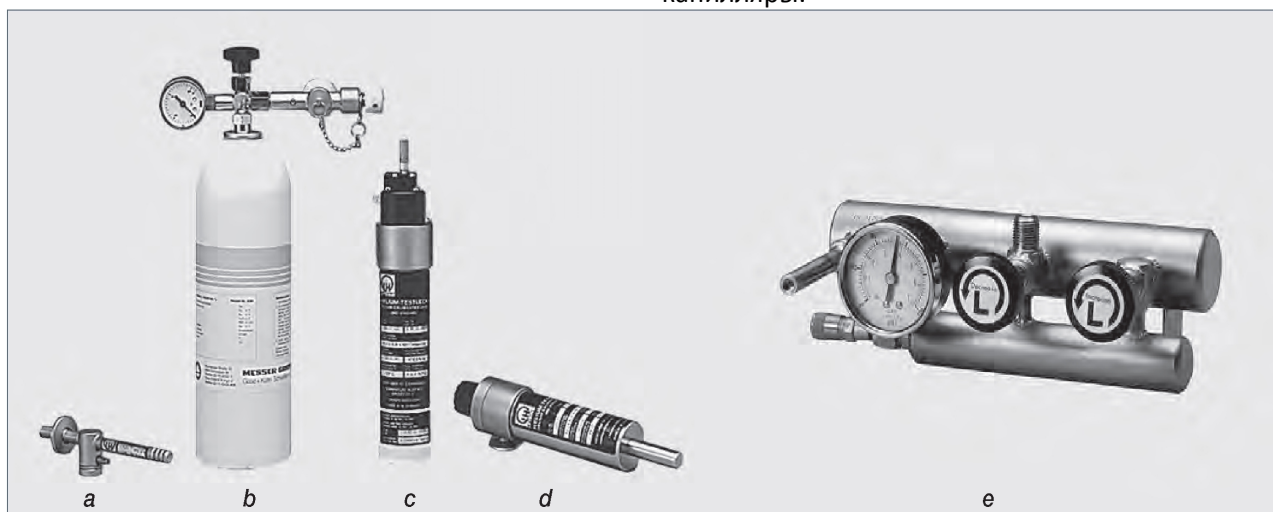


Рис. 10: Примеры комбинации эталонных течей

a Эталонная течь без подачи газа TL4, TL6

b Эталонная течь при использовании течеискателя и вакуумных устройств TL4-6

c (Внутренняя) капиллярная эталонная течь TL7

d Проникающая эталонная течь (также называется «диффузионная эталонная течь») TL8, TL9

e Эталонная течь охлаждающего вещества



Рис. 11: Эталонная течь для методе с атмосферным щупом для течеискания с регулятором давления

5.2.4 Течеискатели с квадрупольным масс-спектрометром

Течеискатели с квадрупольным масс-спектрометром (QMS) прежде всего созданы для того, чтобы обнаруживать вещества тяжелее гелия⁴. Помимо особых случаев, это будут охлаждающие агенты или газы для заполнения ламп. Следовательно, устройства для обнаружения утечки с QMS в большинстве случаев используются для проверки холодильных установок на предмет утечек.

На **Рис. 12** показана вакуумная диаграмма устройства для обнаружения утечки с QMS. На схеме можно увидеть двойную систему подвода газа, состоящую из (прямоточного) подвода охлаждающего агента, через делитель потока 1 и (обратноточного) подвода гелия к турбомолекулярному насосу через делитель потока 2. Таким образом, устройство может использоваться для улавливания охлаждающих агентов и гелия.

Еще одним свойством является использование двухступенчатого мембранного вакуумного насоса для вакуумирования QMS, а также для подачи газового потока на течеискатель (1-я ступень мембранного вакуумного насоса).

5.2.5 Течеискатель с масс-спектрометрами с секторным полем 180°

Течеискатели гелия с использованием масс-спектрометра с секторным полем 180° являются наиболее чувствительными и надежными устройствами по определению утечек. Не существует никаких других методов определения утечек, которые бы были более надежными и более стабильными, при обнаружении и измерении их в количественном отношении. Следовательно, устройства для определения утечек гелия - несмотря на относительно высокую покупную стоимость - являются очень экономичными на более или менее длительный период времени поскольку сам период обнаружения течи очень короткий.

Течеискатели с использованием масс-спектрометра с секторным полем 180°, по сути состоят из трех сборок:

1. Масс-спектрометр
2. Высоковакуумная насосная система
3. Форвакуумная насосная система.

Масс-спектрометр (смотрите **Рис. 13**) состоит из источника ионов (1-4), системы разделения (5-10), и ионной ловушки (11-14). Пучок ионов проходит через отверстие (5). Ионы всегда попадают на магнитное поле (10) на определенной скорости. Внутри магнитного поля, ионы перемещаются по круговым траекториям, тем самым радиус для малых масс меньше, чем для больших масс.

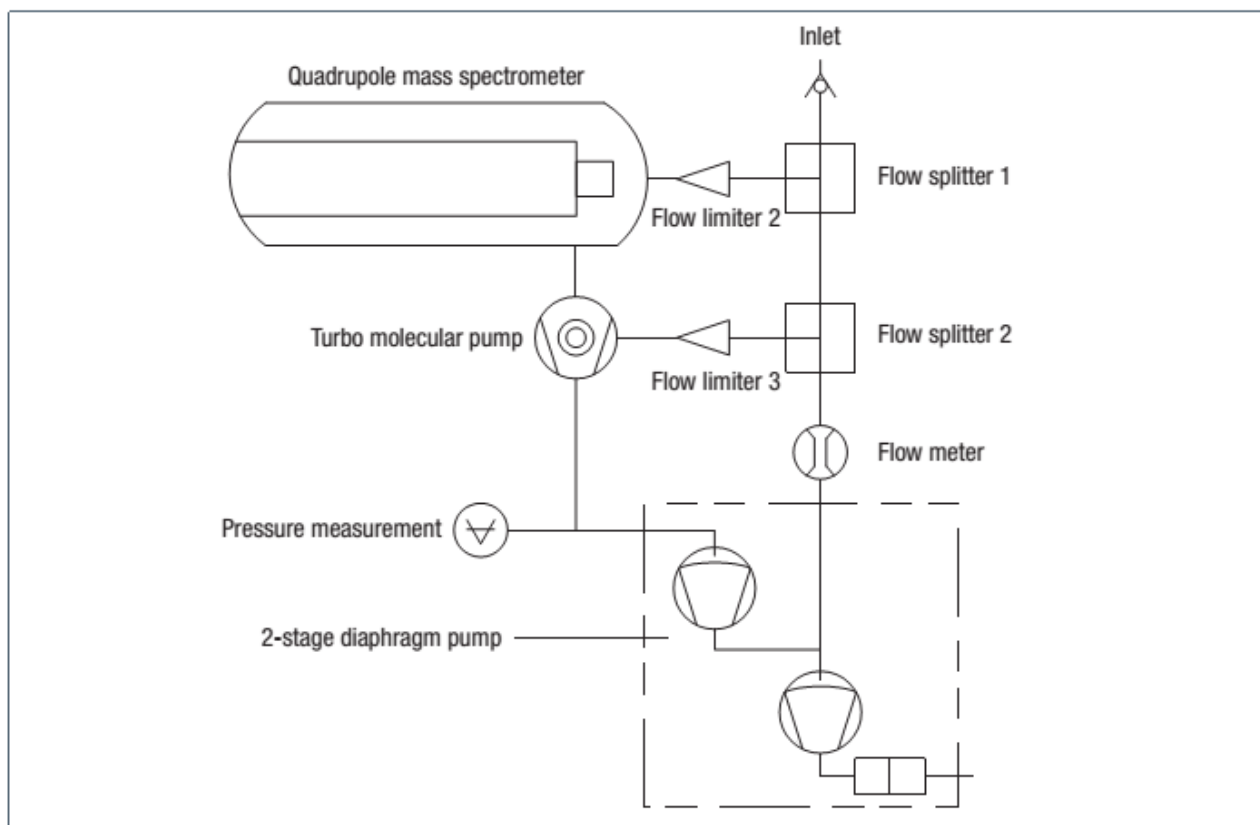


Рис. 12: Вакуумная схема Ecotec II

При правильной установке ускоряющего напряжения во время настройки можно добиться ситуации, в которой ионы гелия⁴ движутся точно по дуге окружности, которая необходима им, для того, чтобы пройти через промежуточную диафрагму (9). Таким образом, ионы гелия⁴ достигают ионной ловушки (13).

Источник ионов имеет простую и прочную конструкцию.

Его можно заменить без особых усилий. Во время работы источник ионов постоянно нагревается и поэтому невосприимчив к загрязнению.

Два выбираемых иридиевых катода, покрытых оксидом иттрия имеют длительный срок службы. Эти катоды в основном нечувствительны к попаданию воздуха, т.е. быстродействующий плавкий предохранитель будет предохранять их от выгорания, даже если поступит воздух. Однако, как и для любых отожженных металлов, длительное использование источника ионов может в конечном итоге привести к охрупчиванию катода и его расколу при воздействии вибрации или удара.

5.2.6 Прямоточные и обратно-поточные течеискатели

В зависимости от способа подачи газа из испытуемого объекта в масс-спектрометр,

можно различать два типа устройств для обнаружения утечки гелия:

1. Прямоточное устройство обнаружения утечек

2. Обратно поточное устройство для обнаружения утечек

На Рис. 14 показаны вакуумные диаграммы двух типов устройств для обнаружения утечек. В обоих случаях, масс-спектрометр откачивается с помощью насосной системы высокого вакуума.

В случае **прямоточного устройства для обнаружения утечек** (левая диаграмма), проверяемый газ подается в масс-спектрометр с помощью холодной ловушки. Холодная ловушка охлаждается жидким азотом (LN_2), и как правило, представляет собою крионасос, в котором все пары и другие примеси конденсируются. В случае использования диффузионного насоса, который обычно применялся в прошлом, холодная ловушка, охлаждаемая с помощью LN_2 поэтому была эффективной защитой для масс-спектрометра от масляных паров, отводимых из диффузионного насоса.

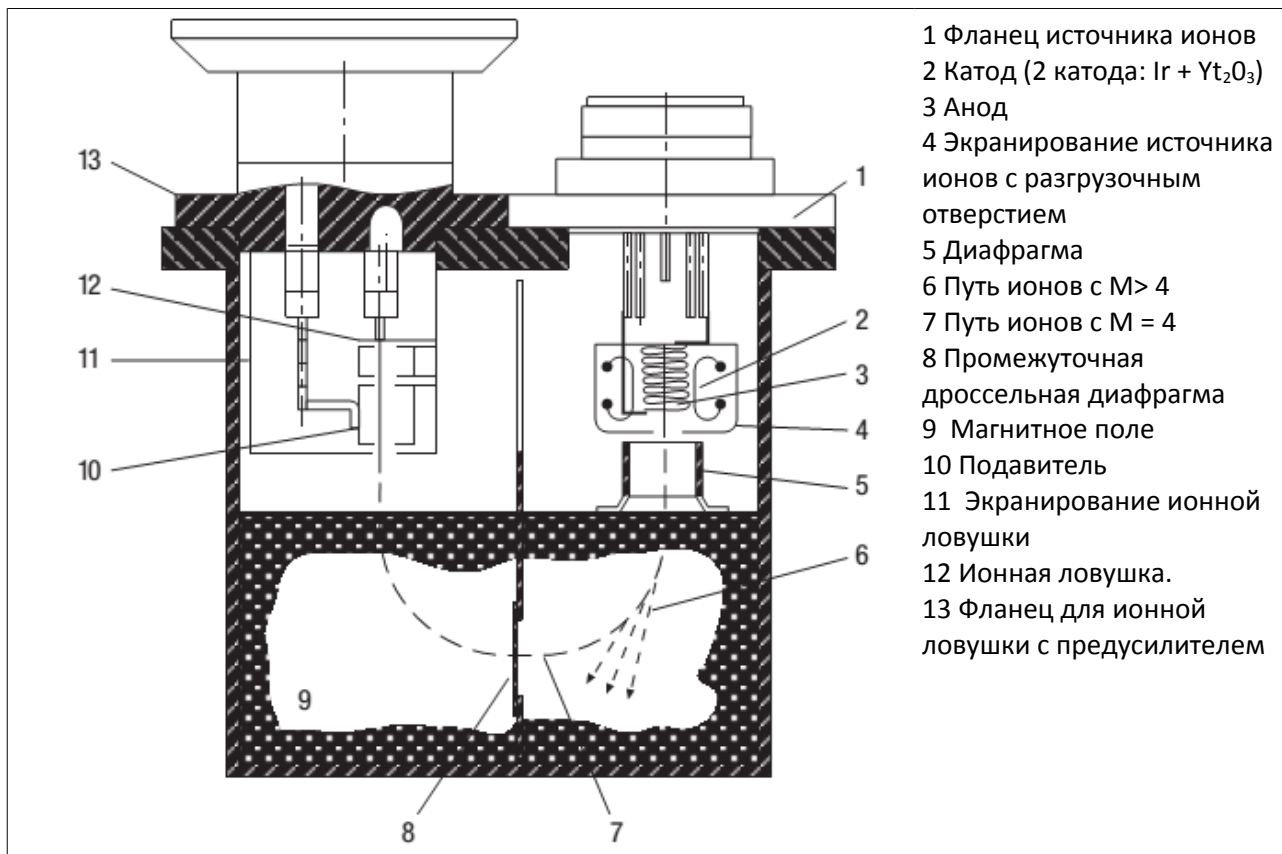


Рис. 13: Конструкция масс-спектрометра с секторным полем 180°

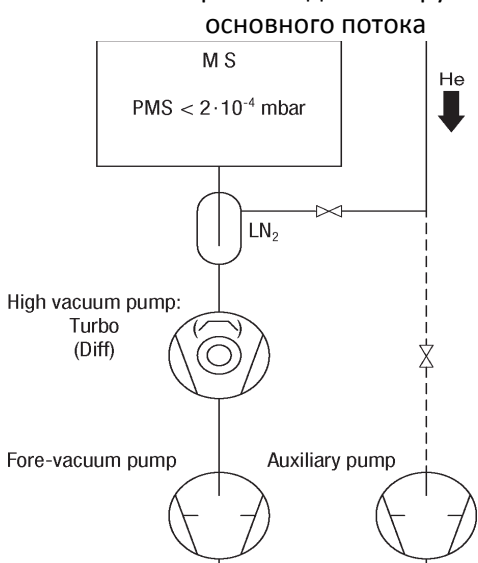
Вспомогательный насос служит для предварительного вакуумирования испытуемого объекта и необходимых соединительных линий. Для того, чтобы иметь возможность подключения высоковакуумной стороны работающего высоковакуумного насоса к испытуемому объекту, вспомогательный насос должен вакуумировать испытуемый объект до давления ниже $5 \cdot 10^{-2}$ мбар. Только после этого можно открыть клапан между вспомогательным насосом и холодной ловушкой. Высоковакуумный насос не должен вакуумировать испытуемый объект, необходимые соединительные линии и масс-спектрометр до давления ниже $2 \cdot 10^{-4}$ мбар. После этого, масс-спектрометр может начать работать с целью обнаружения утечек.

В зависимости от размера утечки в проверяемом объекте и производительности откачки используемых вакуумных насосов, время откачки может быть очень продолжительным. В случае очень большой утечки, вышеназванные значения давления могут быть не достигнуты и вовсе.

Справа на **Рис. 14** показана схема течеискателя с обратной схемой потока. Можно сразу же увидеть существенное различие по сравнению с диаграммой проточного устройства обнаружения утечек: В данном случае высоковакуумный насос вакуумирует только масс-спектрометр (меньший объем, очень малая интенсивность утечки), а не испытуемый объект (большой объем, большую интенсивность утечки в целом).

Следует отметить, что, в случае использования течеискателя с обратным потоком газа,

Решение 1: Устройство для обнаружения утечки



подача проверяемого газа, осуществляется между форвакуумным насосом и высоковакуумным насосом. Это означает, что форвакуумный насос и вспомогательный насос должны создать в проверяемом объекте до давления, при котором форвакуумная сторона высоковакуумного насоса может быть подключена к испытуемому объекту. В случае с современными течеискателями с обратным потоком, это так называемое начальное **давление**, обычно составляющее несколько миллибар (Например, течеискатель Phoenix L300 в режиме обратного потока: начальное давление = 15 мбар). Если на входе устройства достигается начальное давление, оно устройство переходит в режим измерения.

Парциальное давление индикаторного газа $p_{FV, TG}$ между форвакуумным насосом и высоковакуумным насосом увеличивается за счет индикаторного газа TestGas (TG = гелий⁴ или водород), который попадает с течеискатель. При работе высоковакуумного насоса, парциальное давление испытательного газа $p_{HV, TG}$ на высоковакуумной стороне насоса значительно меньше, чем на форвакуумной стороне насоса ($p_{FV, TG}$). Таким образом, определенное количество испытательного газа течет - против направления подачи высоковакуумного насоса - от форвакуумной стороны к высоковакуумной стороне высоковакуумного насоса. Это явление является причиной того, почему данные течеискатели получили название противоточные. В равновесии нижеследующее парциальное давление испытательного газа будет присутствовать на стороне высокого вакуума,

Решение 2: Устройство обнаружения течей в

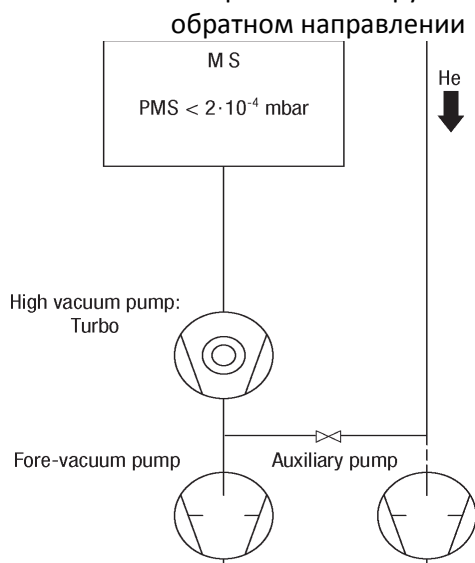


Рис. 14: Сравнение между устройством для обнаружение течей главного потока (слева) и обратноточным устройством обнаружения течей (справа)

т.е. между высоковакуумным насосом и масс-спектрометром: **(5)** $P_{HV, TG} = P_{FV, TG} / C_{0, TG}$

В этом случае, $C_{0, TG}$ относится к компрессии высоковакуумного насоса испытательного газа TG при нулевом потоке испытательного газа (сухой газовый расход испытательного газа через насос высоковакуумный насос равен нулю).

В настоящее время, высоковакуумный насос в противоточных устройствах для обнаружения утечек всегда является турбомолекулярным насосом с комбинированной ступенью. Этот тип высоковакуумного насоса имеет высокие форвакуумные давления (несколько миллибар) и, следовательно, допускает вышеуказанные высокие начальные давления. Процесс обнаружения утечек может выполняться значительно быстрее, чем с помощью течеискателей с диффузионным насосом (форвакуумное давление диффузионного насоса $\approx 5 \cdot 10^{-1}$ мбар).

Турбомолекулярные насосы имеют очень высокую степень сжатия для тяжелых газов (углеводород, пары нефти). Поэтому применяется нижеследующее: В отличие от легких испытательных газов, таких как гелий и водород, тяжелые частицы газа в основном не могут достигнуть масс-спектрометра. Турбомолекулярные насос, таким образом, является оптимальной защитой для масс-спектрометра и не использует устаревшую холодную ловушку, охлаждаемую жидким азотом.

5.2.7 Течеискатель с разделением потока газа

Если вакуумирование испытуемого объекта до необходимого продажного давления невозможно или занимает слишком много времени из-за размера испытуемого объекта или утечки, вспомогательный насос (вспомогательная насосная система) должен использоваться в дополнение к устройству для обнаружения утечки. Устройство для обнаружения утечек затем будет работать в так называемой конфигурации частичного расхода (смотри Рис. 14). Так как вспомогательный насос, как правило, более высокопроизводительный, чем форвакуумный насос, встроенный в устройство для обнаружения утечки, больше количество испытательного газа будет проходить через вспомогательный насос, и только небольшое количество испытательного газа будет проходить через форвакуумный насос. Тем не менее, парциальное давление

испытательного газа на входе форвакуумного насоса и на входе вспомогательного насоса $p_{FV, TG}$ будут идентичными. Поэтому, суммарный поток испытательного газа от испытуемого объекта составит

$$(6) = p_{FV, TG} \cdot (S_{RP, TG} + S_{AP, TG})$$

, где $S_{RP, TG}$ - скорость откачки форвакуумного насоса, встроенного в устройство для обнаружения утечек испытательного газа, в л/сек.

$S_{AP, TG}$ - скорость откачки вспомогательного насоса испытательного газа, в л/сек.

q_L это истинная интенсивность утечки, которую течеискатель должен отображать. Электронная система течеискателя, отображает следующее:

$$(7) q_{L, display} = p_{FV, TG} \cdot S_{RP, TG}$$

То есть: **Интенсивность утечки $q_{L, display}$, которая отображается течеискателем, равна произведению истинной интенсивности утечки q_L и коэффициенту разделения потока.**

$$(7a) \quad q_{L, display} = q_L \cdot \gamma$$

$$(8) \quad \gamma = S_{RP, TG} / (S_{RP, TG} + S_{AP, TG}) \text{ — Коэффициент разделения потока}$$

Коэффициент разделения потока рассчитывается с помощью соотношения (8). На практике, часто имеет смысл определять коэффициент разделения потока экспериментально. Для этого необходимо установить «эталонную течь» со интенсивностью утечки q_L непосредственно на устройство для обнаружения утечек (работа без вспомогательного насоса). Течеискатель будет показывать истинную интенсивность утечки q_L устройства для обнаружения утечки на дисплее. Значение q_L должно быть записано. Теперь такая же «эталонная течь» устанавливается на испытываемый объект, включается вспомогательный насос и записываются показания на дисплее течеискателя. Течеискатель будет отображать $q_{L, display}$. Коэффициент разделения потока γ будет найден из отношения $q_{L, display}$ и q_L :

$$(8a) \quad \gamma = q_{L, display} / q_L$$

5.2.8 Совместная работа с вакуумными системами

Подключение течеискателя к вакуумным системам к большим вакуумным насосным системам реализуется по схеме разделения потока. При рассмотрении вопроса, где лучше всего выполнить соединение прибора, следует иметь в виду, что течеискатель — это портативный блок, который имеет низкую быстроту действия на входном фланце (как правило, $S_{RP, TG} \approx 2 \text{ м}^3 / \text{ч}$).

Из-за больших отличий в скоростях откачки довольно важным моментом является определение коэффициента разделения потока для данного конкретного случая при подключении к системе с диффузионного насоса со скоростью откачки $S_{AP, \text{гг}} = 10,000 \text{ л/сек} = 36\,000 \text{ м}^3 / \text{ч}$, например, - чья интенсивность утечки может быть обнаружена полностью.

В системах с высоковакуумными и вакуумными насосами Рутса, самый надежный вариант для подключения устройства для обнаружения утечки - между центробежным лопастным насосом и вакуумным насосом Рутса или между вакуумным насосом Рутса и высоковакуумным насосом. Если давление больше допустимого давления на входе устройства для обнаружения утечки, устройство должно подключаться с помощью дозирочного (переменная течь) клапана. Естественно, что необходимо иметь доступный подходящий соединительный фланец. Кроме того, целесообразно установить клапан в этой точке на начальном этапе, таким образом, чтобы в случае необходимости,

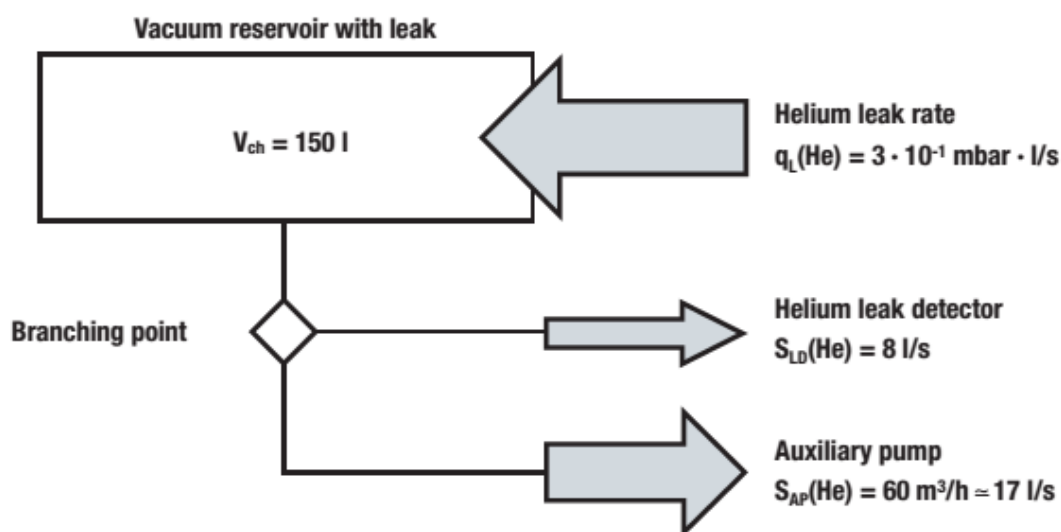
устройство для обнаружения утечки могло быть быстро подключено (с работающей системой) и устройство для обнаружения утечек могло начать работу сразу же после открытия клапана. Для того, чтобы избежать непреднамеренного открытия клапана, он должен быть закупорен с помощью заглушки во время обычной работы вакуумной системы.

Другой способ подключения устройства для обнаружения утечки в крупных вакуумных системах - установить течеискатель на атмосферном выходе системы. После чего он находит увеличение концентрации испытательного газа в выпуске.

$S_{LD} = S_{R, \text{He}}$ = скорость откачки форвакуумного насоса, встроенного в устройство для обнаружения утечки гелия, в л/с, у точки разветвления.

$S_{ap} = S_{AP, \text{He}}$ = скорость откачки вспомогательного насоса, для гелия, в л/сек, у точки разветвления.

Пример использования течеискателей при параллельной работе с вакуумной системой



У точки разветвления, поток гелия q_L , который выпускается из вакуумного резервуара, разделяется на поток гелия $q_{L, \text{display}}$ в направлении устройства для обнаружения утечек и поток гелия q_{AP} в направлении вспомогательного насоса.

Поток гелия в направлении устройства для обнаружения утечки:

Интенсивность утечки $q_{L, \text{display}}$, которая отображается на течеискателе равна произведению истинной интенсивности утечки q_L и коэффициента разделения потока γ !

Расчет показывает, что $\gamma = S_{LD} / (S_{LD} + S_{AP}) \approx (8 \text{ л/сек}) / (8 \text{ л/сек} + 17 \text{ л/сек}) = 0,32$ и

$$q_{L, \text{display}} = q_L \cdot \gamma = (3,0 \cdot 10^{-1} \text{ мбар} \cdot \text{л/сек}) \cdot 0,32 = 9,6 \cdot 10^{-2} \text{ мбар} \cdot \text{л/сек}$$

Вывод: Течеискатель будет отображать не действительную утечку, утечку, которая меньше фактической на $1/\gamma = 1/0,32 \approx 3,1$!

Время отклика $= 3 \cdot \tau = 3 \cdot V_{ch} / S_{eff} = 3 \cdot V_{ch} / (S_{LD} + S_{AP}) \approx (3 \cdot 150 \text{ л}) / (8 \text{ л/сек} + 17 \text{ л/сек}) = 18 \text{ сек}$

Рис. 15: Пример использования устройства для обнаружения утечек, основанного на принципе частичного расхода

5.2.9 Постоянная времени

Постоянная времени вакуумной системы это

$$(9) \tau = V_{ch}/S_{eff}, \text{ где}$$

V_{ch} = объем контейнера в л.

S_{eff} = эффективный вакуум-фактор испытательного газа в контейнере, в л/сек.

На Рис. 16 показана траектория сигнала после опрыскивания места утечки на испытуемом объекте, прикрепленном к устройству для обнаружения утечки, для трех различных конфигураций:

Схема 1: Испытуемый объект (объем V_{ch}) непосредственно подключен к течеискателю LD (эффективная скорость откачки по индикаторному газу = S_{LD}).

Схема 2: В дополнение к схеме 1, к проверяемой камере подключается вспомогательный насос (параллельный вакуумный насос) с такой же эффективной скоростью откачки $S_{AP} = S_{LD}$.

Схема 3: Схема 1 с принудительно дросселированной скоростью откачки насоса до $0,5 \cdot S_{LD}$.

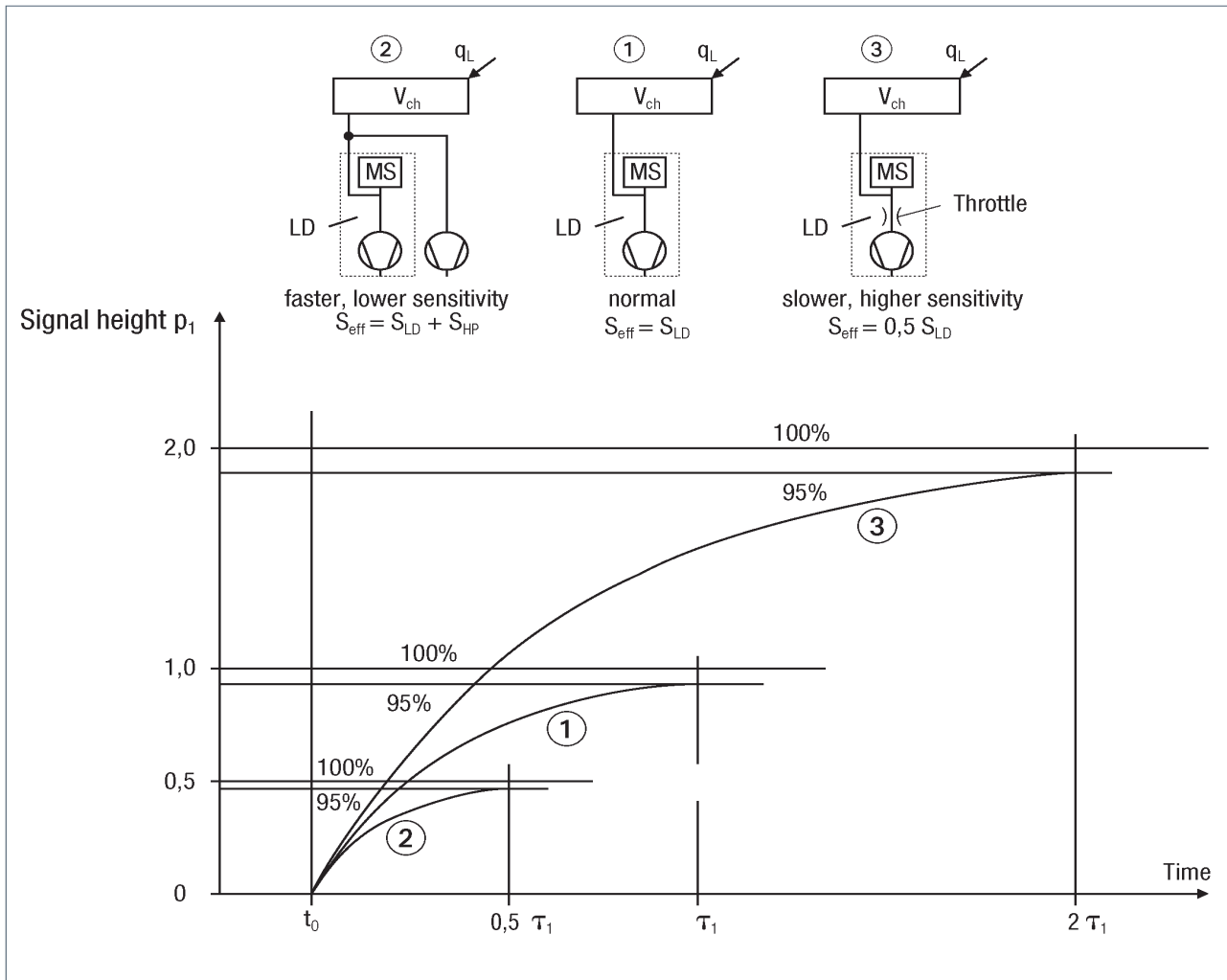


Рис.16: Пример использования течеискателя в режиме разделения потока $p_1 = q_L/S_{eff}$, $\tau = 3 V_{ch}/S_{eff}$

На рисунке показаны 3 кривых сигнала:

Кривая 1 После «времени нечувствительности» t_0 сигнал пропорционален парциальному давлению индикаторного газа p_{TG} , увеличивается с течением времени t по зависимости

$$(10) P_{TG} = (q_L/S_{eff}) \cdot (1 - \exp[-(t - t_0)/\tau])$$

По истечении определенного периода времени, то сигнал достигает области своего предельного значения

$$t - t_0 = 1 \tau \text{ 63,3\% предельного значения}$$

$$t - t_0 = 3 \tau \text{ 95,0 \% предельного значения}$$

$$t - t_0 = 6 \tau \text{ 99,8 \% предельного значения}$$

Предельное значение сигнала пропорционально $p_{TG} = q_L/S_{eff}$ в силу того, что экспоненциальный член в уравнении (10) будет равен 0 при $t - t_0 \gg \tau$. Время $t - t_0$, которое необходимо для достижения 95% конечного значения, называется временем отклика. И равняется 3τ .

Для кривой 1 это дает следующий результат:

Предельное значение сигнала пропорционально $p_{TG} = q_L / S_{eff} = q_L / S_{LD} = p_1$

Время отклика $= 3 \tau = 3 V_{ch} / S_{eff} = 3 V_{ch} / S_{LD} = \tau_1$

Данное распространяется и на кривую 2 (эксплуатация с разделением потока)

Предельное значение сигнала пропорционально

$p_{TG} = q_L / S_{eff} = q_L / (S_{LD} + S_{AP}) = 0.5 \cdot p_1$

Время отклика $= 3 \tau = 3 V_{ch} / S_{eff} = 3 V_{ch} / (S_{LD} + S_{AP}) = 0.5 \cdot \tau_1$

Благодаря установке вспомогательного насоса (параллельный насос), **время отклика** будет сокращено, а **предельное значение сигнала** будет **уменьшаться**. В приведенном выше примере, время отклика уменьшится в два раза, и предельное значение сигнала также уменьшится в 2 раза.

Короткое время отклика означает быстрое изменение и отображение сигнала. Это даст снижение времени, необходимом для обнаружения утечек. Очевидным недостатком данного метода является конечное значение сигнала, которое будет ниже фактического, что в принципе не может привести к проблемам из-за очень высокой чувствительности современных течеискателей.

Вывод: Работа течеискателя методом разделения потока даст уменьшение времени поиска утечки!

Распространив выводы на случай 3:

Предельное значение сигнала пропорционально $p_{TG} = q_L / S_{eff} = q_L / (0.5 \cdot S_{LD}) = 2 \cdot p_1$

Время отклика $3 \tau = 3 V_{ch} / S_{eff} = 3 V_{ch} / (0.5 \cdot S_{LD}) = 2 \cdot \tau_1$

Из-за дросселирования потока газа, **время отклика** всегда увеличивается, **предельное значение сигнала** будет **увеличиваться**. В приведенном выше примере, время отклика удваивается, также удваивается предельное значение сигнала.

Уменьшение скорости откачки всегда связано с большими расходами времени и, таким образом не всегда является преимуществом.

Оценка постоянных времени для процесса поиска утечки в последовательно соединенных емкостях может быть сделана, в первом приближении, вычислением констант времени для каждого объема.

6 Предельные значения / технические характеристики течеискателей

1. Минимальная обнаруживаемая величина утечки ($q_{L, min}$)

2. Эффективная скорость откачки индикаторного газа на входе в прибор ($S_{eff, TG}$)

2а. Эффективная скорость откачки по воздуху на входе в прибор (S_{eff})

3. Максимально допустимое давление внутри проверяемого объекта (p_{max})

(максимальное допускаемое давление на входе)

Максимально допустимое давление P_{max} на входе составляет около 10^{-1} мбар для течеискателей с классическим турбомолекулярным насосом и 2-15 мбар для течеискателей с ТМН с дожимающей ступенью.

4. Максимальный допускаемый расход газа по воздуху (q_{max})

Произведение максимально допустимого давления на входе p_{max} и эффективной скорости откачки по воздуху на входе (S_{eff}) равен максимально допустимому расходу газа для воздуха q_{max} . Если в течеискатель поступает поток газа, больше, чем q_{max} , из-за большого потока натекания течеискатель не будет выходить на режим измерения.

7. Методики обнаружения утечки с помощью течеискателей

7.1 Вакуумный метод - методика распыления (локальное испытание на герметичность)

Испытуемый объект, подключенный к течеискателю, медленно обдувается струей (очень малым количеством) испытательного газа из пистолета-распылителя в вероятных местах утечки (фланцевые соединения, сварные швы и т.д.). Скорость данного процесса поиска утечек определяется временем отклика системы (смотри Главу 5.2.9). Количество распыляемого испытательного газа должно быть отрегулировано с учетом интенсивности утечки, чтобы можно было ее обнаружить, а также с учетом размера и доступности испытуемого объекта.

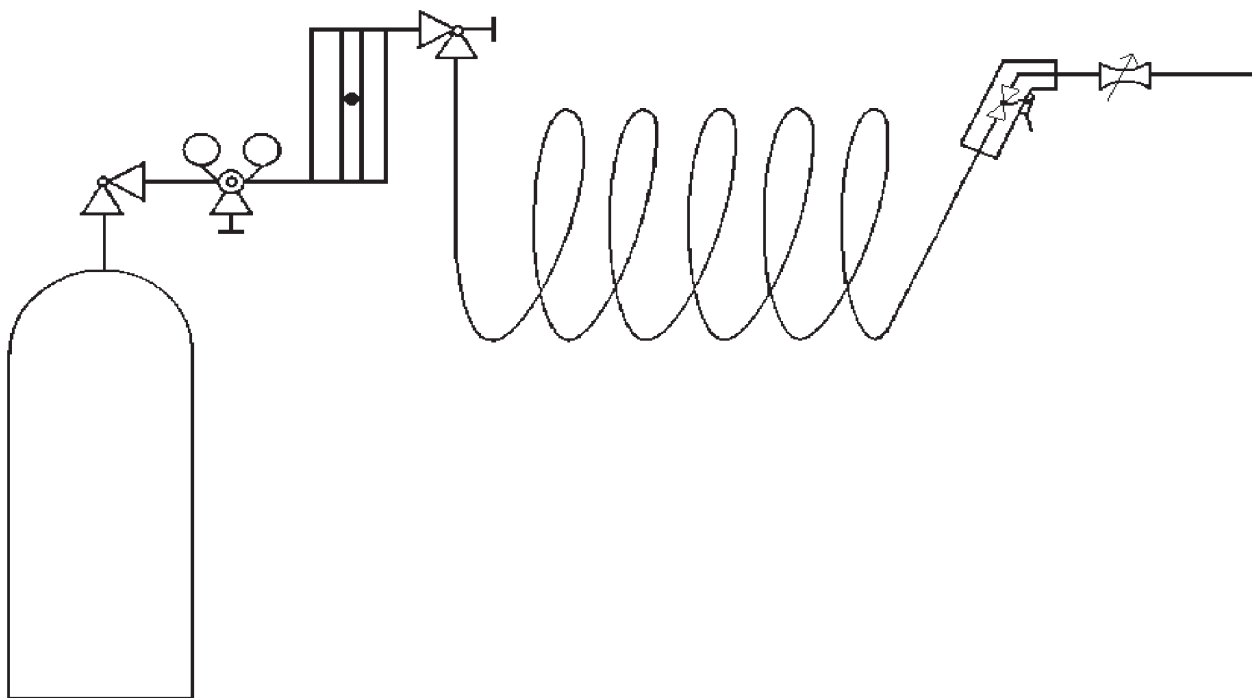
Хотя испытательный газ (водород, гелий) легче воздуха и, следовательно, будет скапливаться под потолком помещения, он будет также хорошо распределяться из-за сквозняков вызванных движениями внутри помещения, поэтому нельзя полагать, что распыляемый газ будет находится в основном (или только) в верхней части помещения во время поиска утечки. Несмотря на это, **рекомендуется**, особенно при работе с большими объемами, начинать поиск утечек с верхней части объема. Для того, чтобы избежать эффекта «задыхания» из-за открытого сопла подачи газа, необходимо использовать пистолет с клапаном, (смотри **Рис. 17**). Самый простой способ отрегулировать необходимый поток индикаторного газа для процесса проверки - погрузить пистолет для обдува емкость с водой и выполнить настройку, основываясь на основе пузырьков индикаторного газа.

С помощью гелиевого течеискателя, возможно обнаружить естественное количество гелия⁴ в атмосфере.

Естественное количество гелия⁴ в атмосфере составляет $5 \cdot 10^{-4}$ объемных процента (5 ppm). Если воздух попадает в проверяемый объем через очень большую негерметичность, течеискатель будет реагировать отображать утечку, так как будет видеть He⁴ попадающий в объем с воздухом. Интенсивность утечки тогда будет:

(11) Утечка (100% гелия⁴ из пистолета-распылителя) / 100% = Утечка(5ppm гелия⁴ из атмосферы) / $5 \cdot 10^{-4}$ % или

(11a) Утечка (100% гелия⁴ из пистолета-распылителя) = $2 \cdot 10^5 \cdot$ утечка (5ppm гелия⁴ из атмосферы)



Рекомендации по избежанию явления насыщения (загрязнения) гелием: клапан пистолета-распылителя должен быть на конце пистолета-распылителя

Минимальный расход гелия для корректного течеискания:

Это поток с, при увеличении которого не увеличивается показание утечки на течеискателе.

Простейший способ проверки расхода гелия: интенсивность образования пузырьков в стакане воды

Рис. 17: Обработка информации для использования испытательных газов (например, гелия)

7.2 Метод избыточного давления индикаторного газа - Методика с щупом для течеискания (локальная проверка на герметичность)

При этом способе, испытываемый объект заполняется индикаторным газом до такого давления, чтобы парциальное давление индикаторного газа в проверяемом объекте было значительно больше давления снаружи проверяемого объекта. Если это возможно, испытываемый объект должен быть вакуумирован перед заполнением его с испытательным газом.

Вероятные места утечек проверяемого объекта медленно проходятся наконечником щупа. Типичная скорость обхода контура составляет 1 см/сек.

Наконечник щупа для течеискания соединен с форвакуумным насосом течеискателя (смотри Рис. 4d) с помощью длинной трубки (длина - 1 м, диаметр - 1 мм). Индикаторный газ, который поступает в наконечник атмосферного щупа для течеискания, попадает в течеискатель с помощью форвакуумного насоса, а затем анализируется в приборе с помощью масс-спектрометра.

Вакуумные течеискатели компании Leybold могут «обнаруживать» как гелий 4 ($He4$), гелий 3 ($He3$) и водород ($H2$).

Чувствительность метода и точность определения места утечки зависит от

- a) типа щупа (наконечник щупа + длина линии),**
- b) времени отклика используемого течеискателя**
- c) скорости обхода объекта щупом**
- d) расстояния от наконечника щупа до места негерметичности.**

Из-за наличия большого числа параметров в методе щупа сложно нельзя говорить о точном количественном измерении утечки. С помощью течеискателя, можно обнаруживать утечки величиной более $1 \cdot 10^{-7}$ мбар·л/сек. Ограничение по чувствительности при обнаружении гелия⁴ объясняется прежде всего его естественным присутствием в атмосфере. При необходимости проведения точных количественных измерений, течеискатель и щуп для течеискания должны калиброваться вместе. В этом случае будет учтено расстояние от наконечника щупа до «эталонной течи».

7.3 Проверка суммарной утечки (испытание на герметичность)

Проверка с помещением объекта в оболочку применяется для определения суммарной герметичности объекта. При этом способе, испытываемый объект заключен в жесткий (обычно металлический) корпус или легкую пластиковую оболочку. Гелий⁴, который течет через места негерметичности проверяемого объекта обнаруживается с помощью течеискателя.

Проверка объекта в камере осуществляются в соответствии с вакуумным методом (проверяемый объект под вакуумом, Рис.4a), а также методом избыточного давления (испытываемый объект под давлением, Рис. 4c). В обоих случаях может возникнуть необходимость осуществить пересчет количественного показания утечки с течеискателя для перевода на стандартную гелиевую течь..

7.3.1 Проверка помещением объекта в оболочку согласно методике избыточного давления.

a) Проверка помещением объекта в оболочку с измерением концентрации и соответственно определением величины утечки.

Для того, чтобы определить суммарную утечку проверяемого объекта, объект помещается в оболочку, которая может быть жесткой или гибкой. Гелий⁴, протекая через места негерметичности проверяемого объекта накапливается в оболочке, так что концентрация гелия в оболочке увеличивается. После установленного времени накопления (рабочий период) проводится измерение концентрации гелия щупом течеискателя (Рис. 4c). Общая интенсивность утечки (суммарная величина утечки) может быть рассчитана после калибровки тестовой конфигурации с известной концентрацией, например, атмосферным воздухом (5 частей на миллион).

Этот метод позволяет обнаружить даже самые малые общие утечки и подходит, в частности, для автоматизированного промышленного испытания на герметичность. Так как измеряет накопленный газ, метод имеет более низкие пределы измерений, а такие факторы, как температура, расход воздуха и скорость обхода щупом отсутствуют. При использовании пластиковых оболочек необходимо учитывать проницаемость гелия через пластиковую оболочку в течение длительного времени.

б) Проверка помещением объекта в оболочку с измерением концентрации и соответственно определением величины утечки (жесткая оболочка)

Проверяемый объект, заполненный гелием, помещается в жесткий объем, который соединен с течеискателем, суммарная интенсивность утечки будет отображена непосредственно на течеискателе.

7.3.2 Проверка помещением объекта в оболочку вакуумным методом

а) Нежесткая оболочка

Откачанный (под вакуумом) проверяемый объект, соединенный с течеискателем, помещен нежесткую оболочку. Перед тем как заполнить оболочку гелием, она максимально прижимается к проверяемому объекту, для того, чтобы удалить, насколько это возможно, имеющейся в ней атмосферный воздух.

Под оболочку запускается гелий и вся внешняя поверхность проверяемого объекта контактирует с индикаторным газом (гелием). Индикаторный газ поступает в проверяемый объект через негерметичности, тем самым складывается суммарная величина натекания.

В случае повторных испытаний в замкнутых пространствах, следует отметить, что концентрация гелия в пространстве будет увеличиваться довольно быстро после удаления оболочки.

Целесообразно для «одноразового тестирования» больших систем использовать пластиковые пакеты.

б) Жесткая оболочка

Жесткие оболочки следует использовать в случае тестовых серий для определения суммарной интенсивности утечки. Также имеется преимущество, откачки гелия и повторной закачки.

7.4 Испытание опрессовкой, измерение остаточного фона

Метод используется для проверки герметичности компонентов, которые уже герметичны, и внутри заполнены индикаторным газом. В качестве примера могут быть - например, корпуса микросхем, транзисторы, лазерные диоды, язычковые герконы, кварцевые генераторы. Их помещают в сосуд заполненный гелием под давлением (5-10 бар). Элементы при наличии негерметичности насыщаются индикаторным газом за определенное время. Процесс называется «опрессовкой».

Для проверки герметичности, проверяемые объекты помещаются в вакуумной камере (жесткая оболочка) после «опрессовки», и - как описано в методе испытания в жесткой оболочке, в соответствии с вакуумным методом — проверяют их суммарную интенсивность утечки. При проверке объектов с большими негерметичностями, теряют большую часть накопленного индикаторного газа во время вакуумирования вакуумной камеры до требуемого давления включения течеискателя, поэтому течеискатель не покажет утечек.

Таким образом, для проверки изделий с большой негерметичностью данный способ опрессовки и измерения обще

8 Промышленное испытание на герметичность

Промышленные испытания на герметичность с использованием гелия в качестве индикаторного газа характеризуются прежде всего тем, что сам модуль течеискателя должен быть полностью интегрирован в производственную линию. В ходе разработки и конструировании таких испытательных установок, должны приниматься во внимание конкретные задачи, которые могут быть различны (например, испытания на герметичность автомобильных колесных дисков бескамерных шин, топливных баков или испытания на герметичность компонентов для кондиционирования воздуха или испытание на герметичность металлических бочек).

Проверяемые детали подаются на участок проверки герметичности (испытание с помещением в жесткую оболочку), где выполняется испытание на герметичность, посредством конвейерной системы. Детали, которые имеют утечки могут обнаруживаться и отбраковываться очень быстро.

Поскольку затраты всегда играют важную роль в случае промышленного испытания на герметичность, потребление гелия должно быть настолько низким, насколько это возможно. Это достигается, например, с помощью использования смеси гелия и воздуха в качестве испытательного газа вместо 100% гелия.

Концентрация гелия $c(\text{He})$ определяется парциальным давлением гелия $p(\text{He})$ (= давление гелия в смеси) по отношению к общему давлению p (= давление смеси гелий/воздух):

$$c(\text{He}) = p(\text{He}) / p = p(\text{He}) / [p(\text{He}) + p(\text{воздух})]$$

Интенсивность утечки $q_{L, \text{display}}$ пропорциональна $c(\text{He})$ и пропорциональна «истинной интенсивности утечки» q_L , которая будет измеряться при $c(\text{He}) = 1$.

Применяется следующая зависимость:

$$q_{L, display} = c(He) \cdot q_L$$

В данном метода уменьшения потребления гелия, однако, всегда важно проверять, находится ли «уменьшенная интенсивность утечки» с $(He) \cdot q_L$ по-прежнему в пределах допустимого рабочего диапазона устройства для обнаружения утечки и может ли поэтому это быть правильно отображено

Преимущества промышленного испытания на герметичность с использованием гелия в качестве испытательного газа можно сформулировать следующим образом:

- Минимальный предел определяемой утечки гелиевым течеискателем значительно ниже, чем негерметичности, которые должны обнаруживаться на практике.
- Суммарная проверка на герметичность также позволяет обнаруживать микроскопические и связанные с пористостью материала утечки.

- Процедура испытания и последовательность испытания могут быть автоматизированы.

- Циклическая, автоматическая проверка системы тестирования обеспечивает высокую надежность тестирования.

- Гелий является нетоксичным и неопасным газом

- Количественный результат испытания может быть быстро и легко задокументирован вместе со всеми параметрами процесса.

Промышленные испытания на герметичность с использованием гелиевого течеискателя и гелия в качестве индикаторного газа приводят к значительному выигрышу во времени (длительности циклов всего несколько секунд) и значительному повышению надежности испытания. Поэтому, в технологичных производствах от традиционных методов промышленного испытания на герметичность вакуумных изделий, таких как «водяная ванна» и «испытание мыльной пеной» на практике уже в основном отказались.

9 Формулы по технике течеискания

9.1 Давление газа и единицы измерения давления

Под давлением газа подразумевается воздействие газа на стенку (согласно DIN 28400):

Давление (P)= величина силы (F_N) на единицу площади (A)

$$P = F_N / A$$

В системе СИ давление(P) в Па. Также возможно использовать единицы бар. В вакуумной технологии принято использовать единицу измерения миллибар (мбар).

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$$

$$1 \text{ бар} = 1000 \text{ мбар} = 10^5 \text{ Па} = 10^5 \text{ Па/м}^2$$

$$1 \text{ мбар} = 100 \text{ Па} = 1 \text{ гПа}$$

$$\text{Единицы измерения силы: } 1 \text{ Н} = 1 \text{ кг/м}^2$$

$$\text{Единицы измерения площади: } 1 \text{ м}^2, 1 \text{ см}^2, (1 \text{ м}^2 = 10,000 \text{ см}^2 = 10^4 \text{ см}^2)$$

9.1.1 Парциальное давление — общее давление

Пример для смеси газа: воздух

Нормальное давление: P_n=1013,25 мбар

Нормальная температура: T_n=273,15 К

Универсальная газовая постоянная: R=83,145 (мбар·л)/(моль·К)

Молярный объем идеального газа: V_{M,n}=R·T_n/p_n=22,14 л/моль

Объем камеры: V=100,00 л

Для сухого воздуха при p_n: T_n: V=100л

Компонент	Состав (концентрация)	Масса	Молярная масса	Молярная доля	Парциальное давление	
N		$c_i=y_i/y$	$m_i=(M_i/V_{m,n})\cdot V\cdot c_i$	M_i	$y_i=m_i/M_i$	Мбар
			г	г/моль	моль	
1	N ₂	78,10%	97,609	28,013	3,484	791,87
2	O ₂	20,90%	29,837	31,999	0,932	211,91
3	Ar	0,90%	1,604	39,948	0,040	9,13
4	CO ₂	0,03%	0,065	44,010	0,001	0,33
5	H ₂	<1,0·10 ⁻³ %	0,000	2,013	0,000	1,0·10 ⁻²
6	He	5,0·10 ⁻⁴ %	0,000	4,003	0,000	5,1·10 ⁻³
7	Ост.	0,07%				
Всего		100%	129,116	28,959	4,459	1013,25
			$m=\sum_i m_i$	$M=m/y$	$y=\sum_i y_i$	$P_{общ}=\sum_i p_i$

9.2 Количество газа

Количество газа=давление · объем = $p \cdot V = pV$ – единицы измерения мбар·л

9.2.1 Уравнение состояния для идеального газа

$p \cdot V = (m/M) \cdot (R \cdot T)$, где

p – давление газа в мбар

V – объем занимаемый газом, л

m – масса газа, г

M – молекулярная масса газа (молекулярный вес), г/моль

T – температура газа в К

R – универсальная газовая постоянная = 83,145(мбар·л)/(моль·К)

9.3 Газовый поток

Газовый поток Q равен изменению количества газа с течением времени= $\Delta(p \cdot V)/\Delta t$, единицы измерения мбар·л/с, где Δt – период времени в секундах, с

9.3.1 Массовый расход газа

$Q = \Delta(p \cdot V)/\Delta t = (\Delta m/\Delta t) \cdot (R \cdot T)/M$

следовательно, $\Delta m/\Delta t = (Q \cdot M)/(R \cdot T)$, г/с

9.4 Скорость откачки

Скорость откачки S для вакуумного насоса при входном давлении p_p

равно газовый поток/входное давление = $Q/p_p = S(p_p)$, л/с, м³/ч

Преобразование л/с $\Leftrightarrow$ м³/ч

1 л/с = 3,6 м³/ч

1 м³/ч = 1/3,6 л/с = 0,28 л/с

, где Q - газовый поток через вакуумный насос в мбар·л/с

p_p - давление на входе в вакуумный насос в мбар.

9.5 Уровень течи (величина утечки)

Величина утечка q_L = газовый поток через существующую негерметичность, мбар·л/с

9.5.1 Уровень течи (величина утечки) для методов повышения/падения давления

Величина утечка $q_L = \Delta(p \cdot V)/\Delta t = V \cdot (\Delta p / \Delta t)$, т. к. V (объем) неизменный,

единицы измерения мбар·л/с

, где V – объем проверяемого объема, л

Δp – разность давления в проверяемом объеме по прошествию времени Δt , мбар

Δt – промежуток времени, с

9.6 Концентрация индикаторного газа

Концентрация индикаторного газа c_{TG} равна отношению парциального давления газа на общее (суммарное) давление смеси

$c_{TG} = p_{TG}/p_T \cdot 100\%$

9.6.1 Определение уровня течи при снижении концентрации индикаторного газа

Уровень течи $q_{L,disp}$ отображаемый гелиевым течеискателем равен произведению концентрации индикаторного газа на полученный уровень течи q_L

$$q_{L,disp} = C_{TG} \cdot q_L$$

, где C_{TG} – концентрация индикаторного газа

p_{TG} – парциальное давление индикаторного газа, мбар

p_T – суммарное давление смеси газа, мбар

$q_{L,disp}$ – уровень течи отображаемый на дисплее течеискателя, мбар · л/с

q_L – истинный уровень течи (при концентрации смеси 100%, $C_{TG}=1$), мбар · л/с

9.7 Зависимость потока от температуры

Для ламинарного режима течения

$$q_L(T_2) \cdot (T_2)^{1/2} = q_L(T_1) \cdot (T_1)^{1/2}$$

Для молекулярного режима течения

$$q_L(T_2) \cdot (T_1)^{1/2} = q_L(T_1) \cdot (T_2)^{1/2}$$

, где $q_L(T_1)$ — уровень течи измеренный при температуре T_1 , мбар · л/с

$q_L(T_2)$ — уровень течи измеренный при температуре T_2 , мбар · л/с

T_1 — температура T_1 , K

T_2 — температура T_2 , K

9.8 Зависимость утечки от давления индикаторного газа

Для ламинарного режима течения

$q_L = q_N \cdot (p_B^2 - p_A^2)$ — для давлений ниже атмосферы

$q_L = q_N \cdot (p_A^2 - p_B^2)$ — для давлений выше атмосферы

Для молекулярного режима течения

$q_L = q_N \cdot (p_B - p_A)$ — для давлений ниже атмосферы

$q_L = q_N \cdot (p_A - p_B)$ — для давлений выше атмосферы

, где q_L — уровень утечки, мбар · л/с

Индикаторный газ идет из-за разности парциальных давлений p_B и p_A

q_N — величина стандартной течи, мбар · л/с

Индикаторный газ течет по разности давлений 1 бар к 0 бар

p_A — парциальное давление внутри проверяемого объекта, бар (абс)

p_B — парциальное давление снаружи проверяемого объекта, бар (абс)

9.9 Изменение типа газа

Для ламинарного режима течения

$$q_{L,gas A} \cdot \eta_{gas A} = q_{L,gas B} \cdot \eta_{gas B}$$

Для молекулярного режима течения

$$q_{L,gas A} \cdot (M_{gas A})^{1/2} = q_{L,gas B} \cdot (M_{gas B})^{1/2}$$

Таблица молекулярных масс и вязкостей газов

Тип газа	Обозначение	Молярная масса , г/моль	Вязкость при 25°C η_v (25°C)[10 ⁻⁶ Па·с]
Водород	H ₂	2,0	8,9
Гелий	He	4,0	19,7
Метан	CH ₄	16,0	11,2
Аммиак	NH ₃	18,0	9,5
Неон	Ne	20,2	31,6
Моноксид углерода	CO	28,0	17,7
Азот	N ₂	28,0	17,9
Воздух		29,0	18,3
Кислород	O ₂	32,0	20,5
Хлорид водорода	HCL	36,5	14,6
Аргон	Ar	40,0	22,8
Углекислый газ	CO ₂	44,0	148
R23	CHF ₃	70,0	14,8
Хлор	Cl ₂	70,9	13,6
R14 (эндогаз)	CF ₄	80,0	174
Криптон	Kr	83,8	25,5
R22	CHClF ₂	86,5	12,8
Фосген	COCl ₂	98,9	11,0
R134a	CH ₂ FCF ₃	102,0	14,1
R13	CClF ₃	104,5	14,5
R502	CHClF ₂ /CClF ₂ -CF ₃	111,6	12,8
R12	CClF ₂	120,9	12,7
Ксенон	Xe	131,3	23,2
R11	CCl ₃ F	137,4	11,0
Гексафторидсеры	SF ₆	146,1	15,7
R13 B1	CBrF ₃	148,9	14,4

9.10 Перевод утечки жидкости в газовую утечку

$$q_{L, \text{gas}} = c \cdot q_{L, \text{li}} \cdot (p_1 + p_2) / 2$$

, где $q_{L, \text{gas}}$ - уровень утечки по газу, мбар · л/с

$q_{L, \text{li}}$ - уровень утечки по жидкости, см³/с

c - $\eta_{\text{li}} / \eta_{\text{gas}}$ постоянная вещества

p_1, p_2 - давление жидкости по обе стороны течи, бар

9.10.1 Константа вещества с

Вещество	Плотность ρ (20°C), г/см ³	Формула	с (воздух)	с (гелий)
Вода	0,9982	H ₂ O	55	50
Тетрахлорид углерода	1,5950	CCl ₄	101	93
Этанол	0,7893	CH ₃ CH ₂ OH	55	61
Бензин	0,8990	C ₆ H ₆	90	83
Соляная кислота, 36%	1,1791	HCL	109	101
Серная кислота, 60%	1,4987	H ₂ SO ₄	323	298
Ацетон, 10%	0,9849	CH ₃ COCH ₃	68	63
Аммиак, 10%	0,9575	NH ₃	62	57
Глицерин, 15%	1,2600		81	75
Глицерин, без H ₂ O	1,2611	C ₃ H ₅ (OH) ₃	9,62 104	8,86 104
Метанол	0,7917	CH ₃ OH	32	30
Этилен гликоль	1,0765	C ₂ H ₂ (OH) ₂	275	253
Ртуть	13,55	Hg	53 103	49 103

9.11 Соотношения в режиме разделения потока

$$Y = S_{LD}/S_{LD} + S_{PF} = q_{L,disp}/q_L$$

$q_{L,disp} = Y \cdot q_L$, где S_{LD} - скорость откачки течеискателя, л/с

S_{PF} — скорость откачки дополнительного(параллельного) насоса, л/с

$q_{L,disp}$ — величина уровня течи отображаемая на течеискателе, мбар · л/с

q_L — истинный уровень течи, мбар · л/с

9.11.1 Время отклика

В установившемся режиме время отклика для отображения величины утечки 95% от максимальной.

$$t_{R,95\%} = 3 \cdot V / S_{eff}$$

В установившемся режиме время отклика для отображения величины утечки 87% от максимальной.

$$t_{R,87\%} = 2 \cdot V / S_{eff}$$

В установившемся режиме время отклика для отображения величины утечки 63% от максимальной.

$$t_{R,63\%} = 1 \cdot V / S_{eff}$$

, где V – объем проверяемого объекта, л

S_{eff} – эффективная скорость откачки проверяемого объекта, л/с

9.12 Время откачки

Формула для определения времени откачки от давления $p_{нач}$ до $p_{кон}$ подходит только для давлений выше 0,01 мбар и постоянной скорости откачке на всём диапазоне $p_{нач}$ до $p_{кон}$

$$t(p_{нач} \rightarrow p_{кон}) = V / S_{eff} \cdot \ln(p_{нач} / p_{кон})$$

, где V – объем проверяемого объекта, л

S_{eff} – эффективная скорость откачки проверяемого объекта, л/с

$p_{нач}$ - начальное давление в откачиваемом объеме.мбар

$p_{кон}$ - конечное давление в откачиваемом объеме, мбар

9.12.1 Необходимая скорость откачки

Формула для определения времени откачки от давления $p_{\text{нач}}$ до $p_{\text{кон}}$ подходит только для давлений выше 0,01 мбар и постоянной скорости откачке на всём диапазоне $p_{\text{нач}}$ до $p_{\text{кон}}$

$$S_{\text{eff}}(p_{\text{нач}} \rightarrow p_{\text{кон}}) = V/t \cdot 2,3 \log(p_{\text{нач}}/p_{\text{кон}})$$

$$S_{\text{eff}}(p_{\text{нач}} \rightarrow p_{\text{кон}}) = V/t \cdot \ln(p_{\text{нач}}/p_{\text{кон}})$$

, где V – объем проверяемого объекта, л

S_{eff} – эффективная скорость откачки проверяемого объекта, л/с

$p_{\text{нач}}$ - начальное давление в откачиваемом объеме.мбар

$p_{\text{кон}}$ - конечное давление в откачиваемом объеме, мбар

9.13 Преобразование единиц измерения давления

$1 \downarrow \dots \Rightarrow$	mbar	Pa (N/m ²)	dyn · cm ⁻² (μbar)	atm (phys.)	Torr (mm Hg)	inch Hg	Micron (μ)	cm H ₂ O	kp · cm ⁻²	lb · in ⁻² (at tech.)	lb · ft ⁻² (psi)
mbar	1	10 ²	10 ³	9,87 · 10 ⁻⁴	0,75	2,953 · 10 ⁻²	7,5 · 10 ²	1,02	1,02 · 10 ⁻³	1,45 · 10 ⁻²	2,089
Pa	10 ⁻²	1	10	9,87 · 10 ⁻⁶	7,5 · 10 ⁻³	2,953 · 10 ⁻⁴	7,5	1,02 · 10 ⁻²	1,02 · 10 ⁻⁵	1,45 · 10 ⁻⁴	2,089 · 10 ⁻²
μbar	10 ⁻³	0,1	1	9,87 · 10 ⁻⁷	7,5 · 10 ⁻⁴	2,953 · 10 ⁻⁵	7,5 · 10 ⁻¹	1,02 · 10 ⁻³	1,02 · 10 ⁻⁶	1,45 · 10 ⁻⁵	2,089 · 10 ⁻³
atm	1013	1,01 · 10 ⁵	1,01 · 10 ⁶	1	760	29,92	7,6 · 10 ⁵	1,03 · 10 ³	1,033	14,697	2116,4
Torr	1,33	1,33 · 10 ²	1,33 · 10 ³	1,316 · 10 ⁻³	1	3,937 · 10 ⁻²	103	1,3595	1,36 · 10 ⁻³	1,934 · 10 ⁻²	2,7847
in Hg	33,86	33,9 · 10 ²	33,9 · 10 ³	3,342 · 10 ⁻²	25,4	1	2,54 · 10 ⁴	34,53	3,453 · 10 ⁻²	0,48115	70,731
μ	1,33 · 10 ⁻³	1,33 · 10 ⁻¹	1,333	1,316 · 10 ⁻⁶	10 ⁻³	3,937 · 10 ⁻⁵	1	1,36 · 10 ⁻³	1,36 · 10 ⁻⁶	1,934 · 10 ⁻⁵	2,785 · 10 ⁻³
cm H ₂ O	0,9807	98,07	980,7	9,678 · 10 ⁻⁴	0,7356	2,896 · 10 ⁻²	7,36 · 10 ²	1	10 ⁻³	1,422 · 10 ⁻²	2,0483
at	9,81 · 10 ²	9,81 · 10 ⁴	9,81 · 10 ⁵	0,968	7,36 · 10 ²	28,96	7,36 · 10 ⁵	103	1	14,22	2048,3
psi	68,95	68,95 · 10 ²	68,95 · 10 ³	6,804 · 10 ⁻²	51,71	2,036	51,71 · 10 ³	70,31	7,03 · 10 ⁻²	1	1,44 · 10 ²
lb · ft ⁻²	0,4788	47,88	478,8	4,725 · 10 ⁻⁴	0,3591	1,414 · 10 ⁻²	359,1	0,488	4,88 · 10 ⁻⁴	6,94 · 10 ⁻³	1

Нормальные условия: 0°C, на уровне моря, давление
 $p=1013,25\text{мбар}=760\text{мм рт.ст.}=1\text{ атм}$

in Hg – мм ртутного столба

фунт на квадратный дюйм= $\text{lb} \cdot \text{in}^{-2} = \text{lb}/\text{sqin} = \text{psi}$

фунт на квадратный фут= $\text{lb}/\text{sqft} = \text{lb} \cdot \text{ft}^{-2}$

$1\text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2}(\text{cgs})=1\mu\text{bar}(\text{микробар})=1\text{ barye}$

atm – физическая атмосфера

$1\text{ мТорр}(\text{миллиТор})=10^{-3}\text{Торр}=1\mu$

$\text{kgf}/\text{sqcm}^2=\text{кг силы на квадратный см}=\text{kp} \cdot \text{cm}^{-2}=\text{at}$

at – техническая атмосфера

100 — (X мбар/10,13)=Y % вакуума

9.14 Преобразование единиц измерения потока газа, утечки

1 ↓ = .. ⇒ (20 °C)	mbar·l/s (0 °C)	kg · h ⁻¹ (NTP)	kg · h ⁻¹ (NTP)	cm ³ /h	cm ³ /s (R12, 20 °C)(F134, 20 °C)	Torr · l/s	g/a	g/a	μ · cfm	lusec	Pa · l/s	slpm
mbar·l/s	1	4,28 · 10 ⁻³	4,59 · 10 ⁻³	3554	0,987	0,75	1,56 · 10 ⁵	1,54 · 10 ⁵	1593	7,52 · 10 ²	100	59,2 · 10 ⁻³
kg · h ⁻¹ (20 °C)	234	1	1,073	8,31 · 10 ⁵	231	175	-	-	37,2 · 10 ⁴	1,75 · 10 ⁵	23,4 · 10 ³	13,86
kg · h ⁻¹ (0 °C)	218	0,932	1	7,74 · 10 ⁵	215	163	-	-	34,6 · 10 ⁴	1,63 · 10 ⁵	21,8 · 10 ³	12,91
cm ³ /h (NTP)	2,81 · 10 ⁻¹	1,20 · 10 ⁻⁶	1,29 · 10 ⁻⁶	1	2,78 · 10 ⁻¹	2,11 · 10 ⁻¹	44	-	44,7 · 10 ⁻²	2,11 · 10 ⁻¹	2,81 · 10 ⁻²	1,66 · 10 ⁻⁶
cm ³ /s (NTP)	1,013	4,33 · 10 ⁻³	4,65 · 10 ⁻³	3600	1	0,760	1,58 · 10 ⁵	-	1611	760	101	6 · 10 ⁻²
Torr · l/s	1,33	5,70 · 10 ⁻³	6,12 · 10 ⁻³	4727	1,32	1	2,08 · 10 ⁵	2,05 · 10 ⁵	2119	1 · 10 ³	133	78,8 · 10 ⁻³
g/a (R12, 20 °C)	6,39 · 10 ⁻⁶	-	-	2,27 · 10 ⁻²	6,31 · 10 ⁻⁶	4,80 · 10 ⁻⁶	1	-	10,2 · 10 ⁻³	4,8 · 10 ⁻³	6,39 · 10 ⁻⁴	37,9 · 10 ⁻⁸
g/a (F134, 20 °C)	6,50 · 10 ⁻⁶	-	-	-	-	4,88 · 10 ⁻⁶	-	1	10,4 · 10 ⁻³	4,89 · 10 ⁻³	6,5 · 10 ⁻⁴	38,5 · 10 ⁻⁸
μ · cfm	6,28 · 10 ⁻⁴	2,69 · 10 ⁻⁶	2,89 · 10 ⁻⁶	2,24	6,21 · 10 ⁻⁴	4,72 · 10 ⁻⁴	98,16	96,58	1	0,472	6,28 · 10 ⁻²	37,2 · 10 ⁻⁶
lusec	1,33 · 10 ⁻³	5,70 · 10 ⁻⁶	6,12 · 10 ⁻⁶	4,737	1,32 · 10 ⁻³	1 · 10 ⁻³	208	205	2,12	1	13,3 · 10 ⁻²	78,8 · 10 ⁻⁶
Pa · l/s	1 · 10 ⁻²	4,28 · 10 ⁻⁴	4,59 · 10 ⁻⁴	35,54	9,87 · 10 ⁻³	7,5 · 10 ⁻³	1,56 · 10 ³	1,54 · 10 ³	15,93	7,50	1	59,2 · 10 ⁻⁴
slpm	16,88	72,15 · 10 ⁻³	77,45 · 10 ⁻³	60,08 · 10 ³	16,67	12,69	2,64 · 10 ⁶	2,60 · 10 ⁶	26,9 · 10 ³	12,7 · 10 ³	16,9 · 10 ²	1

1 см³(NTP)=1см³ при нормальных условиях

NTP= нормальная температура и давление (1атм, 0°C); R=83,14 мбар·л/(моль·К)

1см³(NTP)/ч³=1 атм см³/ч=нсм³ ч-1= 1 ст. куб сантиметр в час

1sccm=10⁻³ slpm= 10⁻³ норм л/мин=60 sccs

Система единиц измерения СИ:

1 Па·м³/с= 10мбар·л/с; R=8,314 Па·м³/ (моль·К), М в кг/моль

1 см³(NTP)/с=1 sccs=60 см³(NTP)/мин 60 sccs =60 std ccm= 60 норм см³/мин

1 lusec=1·л·μ/с, μ=1 микрон = 10⁻³ Торр

1 lusec=10⁻³ Торр·л/с

Фреон F12 (Ccl₂F₂)M=120,92 г/моль;

Воздух M=28,96 г/моль

9.15 Преобразование Англо-Американских единиц измерения

$1 \downarrow \dots \Rightarrow$	mbar·l/s	cm ³ /s **)	Torr·l/s	Pa·m ³ /s	g/a *)	oz/yr *)	lb/yr *)	atm·ft ³ /min	m·l/s	m·ft ³ /h	m·ft ³ /min
mbar·l/s	1	0,987	0,75	10 ⁻¹	1,56 · 10 ⁵	5,5 · 10 ³	3,4 · 10 ²	2,10 · 10 ⁻³	7,52 · 10 ²	9,56 · 10 ⁴	1593
cm ³ /s **)	1,013	1	0,76	1,01 · 10 ⁻¹	1,58 · 10 ⁵	5,6 · 10 ³	3,44 · 10 ²	2,12 · 10 ⁻³	760	96,6 · 10 ³	1614
Torr·l/s	1,33	1,32	1	1,33 · 10 ⁻¹	2,08 · 10 ⁵	7,3 · 10 ³	4,52 · 10 ²	2,79 · 10 ⁻³	103	1,27 · 10 ⁵	2119
Pa·m ³ /s	10	9,9	7,5	1	1,56 · 10 ⁶	5,51 · 10 ⁴	3,4 · 10 ³	2,09 · 10 ⁻²	7,5 · 10 ³	9,54 · 10 ⁵	15,9 · 10 ³
g/a *)	6,39 · 10 ⁻⁶	6,31 · 10 ⁻⁶	4,80 · 10 ⁻⁶	6,41 · 10 ⁻⁷	1	3,5 · 10 ⁻²	2,17 · 10 ⁻³	1,34 · 10 ⁻⁸	4,8 · 10 ⁻³	0,612	10,2 · 10 ⁻³
oz/yr *)	1,82 · 10 ⁻⁴	1,79 · 10 ⁻⁴	1,36 · 10 ⁻⁴	1,82 · 10 ⁻⁶	28,33	1	6,18 · 10 ⁻²	3,80 · 10 ⁻⁷	0,136	17,34	0,289
lb/yr *)	2,94 · 10 ⁻³	2,86 · 10 ⁻³	2,17 · 10 ⁻³	2,94 · 10 ⁻⁴	4,57 · 10 ²	16	1	6,17 · 10 ⁻⁶	2,18	280	4,68
atm·ft ³ /min	4,77 · 10 ²	4,72 · 10 ²	3,58 · 10 ²	47,7	7,46 · 10 ⁷	2,63 · 10 ⁶	1,62 · 10 ⁵	1	3,58 · 10 ⁵	4,55 · 10 ⁷	7,60 · 10 ⁵
m·l/s	1,33 · 10 ⁻³	1,32 · 10 ⁻³	10 ⁻³	1,33 · 10 ⁻⁴	208	7,34	4,52 · 10 ⁻¹	2,79 · 10 ⁻⁶	1	127	2,12
m·ft ³ /h	1,05 · 10 ⁻⁶	1,04 · 10 ⁻⁶	7,87 · 10 ⁻⁶	1,05 · 10 ⁻⁶	1,63	5,77 · 10 ⁻²	3,57 · 10 ⁻³	2,20 · 10 ⁻⁸	7,86 · 10 ⁻³	1	1,67 · 10 ⁻²
m·ft ³ /min	6,28 · 10 ⁻⁴	6,20 · 10 ⁻⁴	4,72 · 10 ⁻⁴	6,28 · 10 ⁻⁵	98	3,46	2,14 · 10 ⁻¹	1,32 · 10 ⁻⁶	0,472	60	1

1 м·фут³/ч=1,04·10⁻⁵ стан. Куб. см. в секунду

1 кг = 2,2046 фунтов (lb)

1 см³/с(NTP)=1 атм·см³/с= 1ст.куб.см.в с= 1 sccs

1 фут³=28,3168 дм³

1 атм·фут³/мин = 1 cfm(NTP)

1 Па·м³/с= 1 Па·м³/с = 103 Па·л/с

1 lusec=1м·л/с

1 ст. куб.см в сек=760 м·л/с

1микро куб. фута в час=0,0079 микрон л/с

1 lb=16 унций (oz)

1 микрон л/с=0,0013 станд. Л/с = 1lusec

1 ст фут³ в секунду=96,600 микрон фут³/ч

1 м·л/с=127 м·фут³/ч= 0,0013 lusec

9.16 Преобразование единиц измерения температуры

Units/symbol	Conversions to				
1 = ..	Kelvin K	Celsius °C	Fahrenheit °F	Rankine °Ra	Reaumur °Re
Kelvin K	1	K - 273.15	$9/5 \cdot (K - 273.15) + 32$	$9/5 \cdot K$	$(K - 273.15) \cdot 8/10$
Celsius °C	$^{\circ}C + 273.15$	1	$9/5 \cdot ^{\circ}C + 32$	$9/5 \cdot ^{\circ}C + 32$	$^{\circ}C \cdot 8/10$
Fahrenheit °F	$5/9 \cdot (^{\circ}F - 32) + 273.15$	$5/9 \cdot (^{\circ}F - 32)$	1	$^{\circ}F + 459.67$	$5/9 \cdot (^{\circ}F - 32) \cdot 8/10$
Rankine °Ra	$5/9 \cdot ^{\circ}Ra$	$5/9 \cdot ^{\circ}Ra - 273.15$	$^{\circ}Ra - 459.67$	1	$5/9 \cdot (^{\circ}Ra - 273.15) \cdot 8/10$
Reaumur °Re	$5/4 \cdot ^{\circ}Re + 273.15$	$5/4 \cdot ^{\circ}Re$	$9/4 \cdot (^{\circ}Re + 32)$	$9/4 \cdot (^{\circ}Re + 32) + 459.67$	1

9.17 Сравнение шкал температур

	Kelvin	Celsius	Reaumur	Fahrenheit	Rankine
Boiling point H ₂ O	373	100	80	212	672
Body temperature 37 °C	310	37	30	99	559
Room temperature	293	20	16	68	527
Ice point H ₂ O	273	0	0	32	492
NaCl/H ₂ O 50:50	255	-18	-14	0	460
Ice point Hg	34	-39	-31	-39	422
CO ₂ (dry ice)	195	-78	-63	-109	352
Boiling point LN ₂	77	-196	-157	-321	170
Absolute zero	0	-273	-219	-460	0

9.18 Основные газовые законы и зависимости

$p \cdot V = \text{const}$	Для $T = \text{const}$ (изотермический)	Закон Бойля-Мариотта
$V = V_0(1 + \beta_1 \cdot \Theta^*)$	Для $p = \text{const}$ (изобарный)	Закон Гей-Люсака
$p = p_0(1 + \beta_2 \cdot \Theta^*)$	Для $V = \text{const}$ (изохорный)	Закон Амонтона
$\sum_i p_i = p_{\text{общ}}$		Закон Дальтона
$p \cdot V^{k^{**}} = \text{const}$	(Адиабатный)	Закон Пуассона
$\frac{m_1}{V_1} \cdot \frac{m_2}{V_2} = M_1 \cdot M_2$		Закон Авогадро
$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$		Основное уравнение состояния идеального газа
$(p + \frac{a}{V_m^2}) \cdot (V_m - b) = R \cdot T$		Уравнение Ван дер Ваальса (уравнение состояния реального газа) a, b – постоянные (зависят от давления, объема) V_m – молярный объем
$L = T \cdot \frac{dp}{dT} \cdot (V_{m,s} - V_{m,l})$		Уравнение Клаузиуса-Клайперона L – Исходящая теплота T – температура испарения $V_{m,s}; V_{m,l}$ – молярный объем пара и жидкости



Leybold GmbH
Bonner Str. 498 · D-50968 Köln
T +49 (0) 221-347-0
F +49 (0) 221-347-1250
info@leybold.com
www.leybold.com

ООО «Лейфикон Вакуум Сервис»

Официальный дистрибьютор

Leybold GmbH в России

115088, Москва, ул. Угрешская д. 2, стр. 25, оф. 10

тел. (495) 229-23-10

тел. (800) 222-99-12

info@leybold.ru

www.leybold.ru