



ООО «ХайВак»

ИНН: 9719005357 КПП: 771901001 ОГРН: 1207700241176 ОКПО 44863624

E-mail: info@hv-e.ru Тел.: +7 (499) 397-73-13 Сайт: hv-e.ru



---

# ОСНОВЫ Вакуумной Технологии

$$S = \frac{dV}{dt}$$



## Введение

# Основы вакуумной технологии

**Под общей редакцией Доктора Walter Umrath совместно с**

Dr. Hermann Adam †, Alfred Bolz, Hermann Boy, Heinz Dohmen, Karl Gogol, Dr. Wolfgang Jorisch, Walter Monning, Dr. Hans-Jurgen Mundinger, Hans-Dieter Otten, Willi Scheer, Helmut Seiger, Dr. Wolfgang Schwarz, Klaus Stepputat, Dieter Urban, Heinz-Josef Wirtzfeld, Heinz-Joachim Zenker

он занимался редактированием этого издания книги.

Я надеюсь, эта книга даст Вам подходящие ответы так же, как и предыдущее издание.

Доктор Walter Umrath,  
Кельн, август 1998

## Предисловие

Со времени последнего выпуска в 1987 г предыдущей редакции книги Основы Вакуумной технологии произошло много изменений и открытий. Компания Leybold тем временем совершила ряд открытий и ввела новые разработки, к которым относятся сухие химические насосы ALL-ex, системы с крионасосами COOLVAC-FIRST с быстрой регенерацией, турбомолекулярные насосы с магнитными подшипниками (на магнитном подвесе), вакуумметры серии A, преобразователи (трансммиттеры) масс-спектрометров TRANSPECTOR и XPR, течеискатели из серии UL и течеискатель ECOTEC 500 для хладагентов и различных других газов. Более того, в настоящей редакции некоторые разделы описаны более подробно. К ним относятся анализ остаточных газов при низких давлениях, измерения низких давлений, мониторинг давления, открытые и закрытые контуры управления давлением, течеискание. Впервые включены разделы, посвященные устройствам, используемым для измерения и контроля при нанесении покрытий и используемых в вакуумных технологиях процессов нанесения покрытия. Учебный центр Vacuum Technology Training Center компании Leybold в Кельне оказывал неоценимую помощь по подбору литературы и подготовке новых разделов. Я выражаю благодарность всем сотрудникам центра. Хочу выразить особую благодарность сотрудникам Отдела внешних связей Communication Department за помощь в подготовке книги к публикации. К сожалению, доктор Негманн Adam, написавший первые разделы этой книги, не дожид до публикации этой редакции. Несмотря на то, что он находился на пенсии в течении последних нескольких лет,



## Содержание

<b>1</b>	<b>Физика вакуума, величины, их символы, единицы измерения и определения ..... 6</b>	2.2.1	Обзор наиболее широко используемых процессов откачки ..... 64
1.1	Основные термины и понятия в вакуумной технологии ..... 6	2.2.2	Откачка газов (сухие технологические процессы) ..... 66
1.2	Атмосферный воздух ..... 10	2.2.3	Откачка газов и паров (влажные технологические процессы) ..... 67
1.3	Газовые законы и модели ..... 11	2.2.4	Процессы сушки ..... 68
1.3.1	Теория сплошной среды ..... 11	2.2.5	Создание безмасляного вакуума ..... 70
1.3.2	Кинетическая теория газов ..... 11	2.2.6	Методы работы со сверхвысоким вакуумом ..... 70
1.4	Диапазоны давления в вакуумной технологии и их характеристики ..... 12	2.3	Откачка вакуумной камеры и определение размера насоса ..... 71
1.5	Типы потоков и проводимость ..... 12	2.3.1	Откачка вакуумной камеры (без дополнительных источников газа или пара) ..... 71
1.5.1	Режимы течения ..... 13	2.3.1.1	Откачка камеры в области низкого вакуума ..... 72
1.5.2	Расчет проводимости ..... 14	2.3.1.2	Откачка камеры в области высокого вакуума ..... 73
1.5.3	Проводимость трубопроводов и отверстий ..... 15	2.3.1.3	Откачка камеры в области среднего вакуума ..... 74
1.5.4	Проводимость других элементов ..... 17	2.3.2	Определение насоса для предварительной откачки ..... 74
<b>2</b>	<b>Создание вакуума ..... 18</b>	2.3.3	Определение времени откачки по номограмме ..... 76
2.1	Вакуумные насосы: обзор ..... 18	2.3.4	Откачка камеры, в которую подаются газы или пары ..... 77
2.1.1	Объемные (механические) вакуумные насосы ..... 18	2.3.5	Выбор насоса для сушки ..... 77
2.1.1.1	Диафрагменные насосы ..... 18	2.3.6	Фланцы и уплотнения ..... 79
2.1.2	Ротационные насосы с жидкостным уплотнением ..... 20	2.3.7	Выбор подходящих клапанов ..... 79
2.1.2.1	Водокольцевые насосы ..... 20	2.3.8	Газовые шлюзы и арматура без уплотнений ..... 81
2.1.2.2	Насосы с масляным уплотнением ..... 21	<b>3</b>	<b>Вакуумные измерения, мониторинг, управление и регулирование ..... 82</b>
2.1.3	Ротационные насосы с сухим сжатием ..... 28	3.1	Основы измерения низких давлений ..... 82
2.1.3.1	Насосы Рутса ..... 28	3.2	Вакуумметры, показания которых НЕ зависят от рода газа ..... 84
2.1.3.2	Когтевые насосы ..... 32	3.2.1	Пружинный (деформационный) вакуумметр ..... 84
2.1.4	Принадлежности для пластинчатороторных насосов с масляным уплотнением ..... 38	3.2.2	Диафрагменный вакуумметр ..... 84
2.1.5	Конденсаторы ..... 39	3.2.2.1	Мембранные вакуумметры ..... 84
2.1.6	Пароструйные насосы ..... 41	3.2.2.2	Диафрагменные вакуумметры DIAVAC ..... 84
2.1.6.1	Паромасляные (диффузионные) насосы ..... 42	3.2.2.3	Прецизионные диафрагменные вакуумметры ..... 85
2.1.6.2	Эжекторные (бустерные) насосы ..... 44	3.2.3	Ртутные вакуумметры ..... 86
2.1.6.3	Рабочие жидкости ..... 45	3.2.3.1	Вакуумметр с U-образной трубкой ..... 86
2.1.6.4	Обратный поток рабочей жидкости и его подавление (экраны, ловушки) ..... 46	3.2.3.2	Компрессионный вакуумметр Мак-Леода ..... 86
2.1.6.5	Пароэжекторные насосы ..... 47	3.3	Вакуумметры, показания которых зависят от рода газа ..... 88
2.1.7	Турбомолекулярные насосы ..... 48	3.3.1	Вакуумметр с вращающимся ротором SRG (VISCOVAC) ..... 88
2.1.8	Сорбционные насосы ..... 52	3.3.2	Тепловые вакуумметры ..... 89
2.1.8.1	Адсорбционные насосы ..... 53	3.3.3	Ионизационные вакуумметры ..... 90
2.1.8.2	Сублимационные насосы ..... 54	3.3.3.1	Ионизационный вакуумметр с холодным катодом (Пеннинга) ..... 90
2.1.8.3	Магниторазрядные насосы ..... 54	3.3.3.2	Ионизационный вакуумметр с горячим катодом ..... 91
2.1.8.4	Геттерные насосы (NEG насосы) ..... 56	3.4	Настройка и калибровка, национальные стандарты DKD и PTB ..... 95
2.1.9	Крионасосы ..... 56		
2.1.9.1	Типы крионасосов ..... 57		
2.1.9.2	Принцип работы охлаждающей головки ..... 58		
2.1.9.3	Рефрижератор крионасоса ..... 59		
2.1.9.4	Осаждение газов на холодных поверхностях ..... 60		
2.1.9.5	Быстрота действия и расположение криопанелей ..... 60		
2.1.9.6	Характеристики крионасоса ..... 61		
2.2	Выбор процесса откачки ..... 64		



3.4.1	Примеры основных методов измерения давления (в качестве стандартных методов для калибровки вакуумметров) .....	95	4.9	Техническое обслуживание .....	122
3.5	Измерение, регулировка и управление давлением в вакуумных системах .....	97	<b>5</b>	<b>Течеискание</b> .....	<b>123</b>
3.5.1	Основы измерения давления и управления .....	97	5.1	Типы течей .....	123
3.5.2	Автоматическая защита, измерение и управление вакуумных систем .....	97	5.2	Уровень течи, размер течи, поток .....	123
3.5.3	Регулирование давления в системах с низким и средним вакуумом .....	98	5.2.1	Стандартная гелиевая течь .....	125
3.5.4	Регулирование давления в системах с высоким и сверхвысоким вакуумом ..	102	5.2.2	Уравнения преобразования .....	125
<b>4</b>	<b>Анализ газов при низких давлениях с использованием масс-спектрометрии</b> .....	<b>105</b>	5.3	Термины и определения .....	125
4.1	Введение .....	105	5.4	Методы поиска течей без использования течеискателя .....	127
4.2	Исторический обзор .....	105	5.4.1	Тест повышения давления .....	128
4.3	Квадрупольный масс-спектрометр (TRANSPECTOR) .....	106	5.4.2	Тест понижения давления .....	129
4.3.1	Конструкция сенсора .....	107	5.4.3	Поиск течей с использованием вакуумметров, чувствительных к роду газа .....	129
4.3.1.1	Обычный (открытый) источник ионов .....	107	5.4.4	Метод погружения (пузырьковый метод) .....	129
4.3.1.2	Разделение квадрупольной системы .....	107	5.4.5	Метод нанесения (распыления) пены .....	129
4.3.1.3	Система измерения (детектор) .....	109	5.4.6	Проверка в вакуумной камере .....	130
4.4	Подача газа и адаптация давления ..	109	5.4.7	Радиоизотопный метод Krypton 85 ..	130
4.4.1	Дроссель .....	109	5.4.8	Высокочастотные испытания .....	130
4.4.2	Преобразователь давления (конвертер) .....	109	5.4.9	Люминесцентный метод (с использованием красителей) .....	130
4.4.3	Закрытый источник ионов CIS .....	110	5.5	Течеискатели и принцип их работы ..	131
4.5	Графические значения в масс-спектрометрии (характеристики) .....	111	5.5.1	Галогеновый течеискатель (HLD 4000, D-TEC) .....	131
4.5.1	Ширина линии (разрешение) .....	111	5.5.2	Течеискатели с масс-спектрометрами MSLD .....	131
4.5.2	Диапазон масс .....	111	5.5.2.1	Принцип работы течеискателя MSLD .....	132
4.5.3	Чувствительность .....	112	5.5.2.2	Пределы измерения, фон, газобалласт, подавление дрейфа точки нуля .....	132
4.5.4	Минимальное определяемое парциальное давление .....	112	5.5.2.3	Калибровка течеискателя, Контрольные течи .....	133
4.5.5	Минимальный определяемый перепад парциальных давлений (концентрация) .....	112	5.5.2.4	Течеискатели с квадрупольным масс-спектрометром ECOTEC II .....	134
4.5.6	Линейность диапазона .....	112	5.5.2.5	Гелиевые течеискатели с масс-спектрометром на 180° (UL200, UL500) ..	135
4.5.7	Информация о поверхности и прогрев ..	113	5.5.2.6	Течеискатели с прямым и обратным потоками .....	136
4.6	Исследование спектра .....	113	5.5.2.7	Работа с парциальными потоками ..	137
4.6.1	Ионизация и основные проблемы при анализе газов .....	113	5.5.2.8	Подключение к вакуумной системе ..	137
4.6.2	Измерение парциальных давлений ..	118	5.5.2.9	Постоянные времени .....	138
4.6.3	Качественный анализ газов .....	118	5.6	Предельные значения (характеристики течеискателя) .....	139
4.6.4	Количественный анализ газов .....	119	5.7	Определение течей с использованием гелиевого течеискателя .....	139
4.7	Программное обеспечение .....	120	5.7.1	Метод обдува (сопла, локальный поиск течей) .....	139
4.7.1	Стандартное SQX программное обеспечение (DOS) для автономной работы (1MS plus, 1PC, RS232) .....	120	5.7.2	Метод щупа - локальный поиск течей с использованием избыточного давления .....	140
4.7.2	Программное обеспечение MQX (1...8 MS plus, 1PC, RS485) .....	121	5.7.3	Поиск в вакууме (полный поиск течей) ..	140
4.7.3	Программное обеспечение Transpectorware для Windows .....	121	5.7.3.1	Испытание образца, заполненного гелием .....	140
4.7.4	Разработка программного обеспечения Transpector-view .....	121	5.7.3.2	Проверка герметичности откачанных образцов .....	140
4.8	Регулирование парциального давления .....	121	5.7.4	Хранение под давлением .....	141
			5.8	Промышленный контроль герметичности .....	141



<b>6</b>	<b>Контроллеры тонких пленок и блоки управления с кварцевыми осцилляторами ..... 142</b>	8.3.2	Насосы Рутса ..... 163
6.1	Введение ..... 142	8.3.2.1	Общие рекомендации по установке, работе ..... 163
6.2	Основные принципы измерения толщины пленок с кварцевым осциллятором ..... 142	8.3.2.2	Замена масла, техническое обслуживание ..... 163
6.3	Форма кристаллов кварцевого осциллятора ..... 143	8.3.2.3	Действия в случае неисправности ... 164
6.4	Период измерения ..... 144	8.3.3	Турбомолекулярные насосы ..... 164
6.5	Z Метод ..... 145	8.3.3.1	Общие рекомендации по работе ..... 164
6.6	Активный осциллятор ..... 145	8.3.3.2	Техническое обслуживание ..... 165
6.7	Синхронизированный осциллятор .... 146	8.3.4	Диффузионные и пароструйные насосы ..... 165
6.8	Автоматический Z метод ..... 147	8.3.4.1	Замена рабочей жидкости и очистка насоса ..... 165
6.9	Регулирование толщины покрытия .. 148	8.3.4.2	Ошибки при работе с диффузионными и пароструйными насосами ..... 165
6.10	Модели приборов INFICON ..... 151	8.3.5	Адсорбционные насосы ..... 166
<b>7</b>	<b>Применение вакуумной технологии для нанесения покрытий ..... 152</b>	8.3.5.1	Снижение адсорбционной емкости .. 166
7.1	Метод нанесения покрытия в вакууме ... .. 152	8.3.5.2	Замена молекулярной решетки ..... 166
7.2	Источники покрытий ..... 152	8.3.6	Титановые сублимационные насосы 166
7.2.1	Тепловые испарители (кассеты, провода) ..... 152	8.3.7	Магниторазрядные насосы ..... 167
7.2.2	Электронно-лучевые испарители (пушка) ..... 152	8.4	Рекомендации по работе с вакуумметрами ..... 167
7.2.3	Катодное распыление ..... 153	8.4.1	Рекомендации по установке сенсоров ... .. 167
7.2.4	Химическое осаждение ..... 154	8.4.2	Загрязнения в системе измерения и их устранение ..... 167
7.3	Технология вакуумного нанесения покрытий / напылительные установки .... .. 154	8.4.3	Влияние магнитных и электрических полей ..... 168
7.3.1	Нанесение покрытий на отдельные компоненты ..... 154	8.4.4	Соединения (разъемы), блоки питания, системы измерений ..... 168
7.3.2	Нанесение покрытий на компоненты в рулонах ..... 154	<b>9</b>	<b>Таблицы, формулы, номограммы, диаграммы и символы ..... 169</b>
7.3.3	Нанесение покрытий на оптические компоненты (оптические покрытия) .. 155	<b>10</b>	<b>Единицы измерения, используемые в вакуумной технологии ..... 194</b>
7.3.4	Нанесение покрытий на стекло ..... 156	10.1	Введение ..... 194
7.3.5	Установки для производства компакт-дисков ..... 157	10.2	Список переменных, символов и единиц измерения, используемый в вакуумной технологии и областях ее применения (DIN 28 402) ..... 194
<b>8</b>	<b>Рекомендации по работе с вакуумным оборудованием ..... 159</b>	10.3	Комментарии к списку (10.2) ..... 197
8.1	Причины неисправностей, когда указанное предельное давление не достигается, или достигается слишком медленно ..... 159	10.4	Таблицы ..... 199
8.2	Загрязнение вакуумных камер и устранение загрязнений ..... 159	10.4.1	Базовые единицы измерения в системе СИ SI ..... 199
8.3	Общая информация по работе с вакуумными насосами ..... 160	10.4.2	Единицы измерения в системе СИ с названиями и символами ..... 199
8.3.1	Пластинчато-роторные насосы с масляным уплотнением ..... 160	10.4.3	Единицы измерения атомов ..... 199
8.3.1.1	Расход масла, загрязнение масла и его замена ..... 160	10.4.4	Единицы измерения, не указанные в системе СИ с названиями и символами ..... 200
8.3.1.2	Выбор масла насоса при работе с агрессивными парами ..... 161	<b>11</b>	<b>Национальные и международные стандарты и рекомендации, относящиеся к вакуумной технологии ..... 201</b>
8.3.1.3	Измерения при откачке различных химических веществ ..... 161	11.1	Национальные и международные стандарты и рекомендации, относящиеся к вакуумной технологии ..... 201
8.3.1.4	Дефекты в работе при откачке с газобалластом - потенциальные источники ошибок, когда не достигается требуемое предельное давление ..... 162	<b>12</b>	<b>Литература ..... 204</b>

# 1 Физика вакуума, величины, их символы, единицы измерения и определения

(DIN 28 400, Часть 1, 1990, DIN 1314 и DIN 28 402)

## 1.1 Основные термины и понятия в вакуумной технологии

### Давление $p$ (мбар)

среды (газа, жидкости) (величина: давление, символ:  $p$ , единицы измерения: миллибары, сокр: мбар). Понятие Давления определено в стандарте DIN 1314 как соотношение нормированной силы (усилия), прикладываемой к поверхности, и площади этой поверхности (сила, приложенная к площади поверхности). Даже если давление измеряется в Торр (см. раздел 10), то давление следует рассматривать каким образом: 1 Торр – это давление газа, которое может поднять столбик ртути на 1 мм при 0°C (стандартное атмосферное давление составляет 760 Торр или 760 мм.рт.ст.). Давление  $p$  можно определить более подробно следующим образом:

### Абсолютное давление $p_{abs}$

В вакуумной технологии всегда указывается абсолютное давление, поэтому индекс “abs” обычно опускается.

### Общее давление $p_t$

Общее давление в камере является суммой парциальных давлений всех газов и паров, присутствующих в камере.

### Парциальное давление $p_i$

Парциальное давление отдельного газа или пара – это давление, которое этот газ или пар будет создавать, если только он один будет присутствовать в камере.

Важное замечание: в частности в области низкого вакуума под парциальным давлением смеси газов и паров понимается сумма парциальных давлений всех неконденсируемых компонентов, присутствующих в смеси – например, “предельное парциальное давление” для ротационных насосов.

### Давление насыщенного пара $p_s$

Давление насыщенного пара является функцией температуры для любого вещества.

### Давление паров $p_d$

Парциальное давление тех паров, которые могут стать жидкостью при температуре жидкого азота (LN<sub>2</sub>).

### Стандартное (нормальное) давление $p_n$

Стандартное давление определено в стандарте DIN 1343 и составляет  $p_n = 1013.25$  мбар

### Предельное давление $p_{end}$

Означает самое низкое давление, которое может быть достигнуто в камере. Так называемое предельное давление  $p_{end}$  зависит не только от скорости всасывания насоса, но и от давления паров  $p_d$  смазочных материалов, уплотнителей и движущей силы, используемых в насосе. Если камера откачивается просто пластинчатороторным вакуумным насосом с масляным уплотнением с положительным смещением, тогда предельное давление, которое можно получить в камере, будет в первую очередь зависеть от давления паров масла, используемого в насосе, а так же, в зависимости от чистоты камеры, от чистоты стенок камеры и герметичности самой камеры.

### Давление окружающей среды $p_{amb}$ или атмосферное (абсолютное) давление

### Избыточное давление $p_e$ или превышение давления

$$p_e = p_{abs} - p_{amb}$$

здесь положительное значение  $p_e$  будет означать избыточное давление, а отрицательное значение будет характеризовать вакуум.

### Рабочее давление $p_w$

Во время откачки газы и/или пары удаляются из камеры. Под газом понимается такое состояние, когда вещество не конденсируется при рабочей температуре. Паром обозначается состояние, когда вещество может быть в газообразном состоянии, но и может превращаться в жидкость при преобладающей температуре с повышением давления. В результате образуется насыщенный пар, который при данной температуре представляет собой газ и равное количество жидкой фазы данного вещества. Четкое разграничение понятий газа и пара будет приведено дополнительно там, где это необходимо для лучшего понимания процесса.

### Количество частиц $n$ (см<sup>-3</sup>)

В соответствии с кинетической теорией газа число молекул газа  $n$  в объеме зависит от давления  $p$  и термодинамической температуры  $T$  и выражается следующим образом:

$$p = n \cdot k \cdot T \quad (1.1)$$

$n$  = количество частиц,  $k$  = постоянная Больцмана.

Поэтому, при данной температуре давление, создаваемое газом, зависит только от количества



молекул, а не от типа газа. Природа молекул газа характеризуется их массой  $m_T$ .

**Плотность газа**  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>, г/см<sup>3</sup>)

Плотность газа  $\rho$  является произведением количества частиц  $n$  на их массу  $m_T$ :

$$\rho = n \cdot m_T \quad (1.2)$$

### Закон идеального газа

Отношение между массой молекул газа  $m_T$  и молярной массой  $M$  этого газа следующее:

$$M = N_A \cdot m_T \quad (1.3)$$

Число Авогадро  $N_A$  означает, какое количество молекул газа будет содержаться в одном моле газа, а так же является коэффициентом пропорциональности между газовой постоянной  $R$  и постоянной Больцмана  $k$ :

$$R = N_A \cdot k \quad (1.4)$$

Учитывая выражения (1.1)-(1.4) получаем выражение для давления и плотности идеального газа:

$$p = \rho \frac{R \cdot T}{M} \quad (1.5)$$

На практике мы часто имеем некий закрытый объем  $V$ , в котором существует давление газа  $p$ . Если  $m$  – масса газ, присутствующего в объеме, то

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.6)$$

Закон идеального газа получается прямо из выражения (1.5)

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T = \nu \cdot R \cdot T \quad (1.7)$$

Здесь соотношение  $\frac{m}{M}$  является количеством молей  $\nu$ , присутствующим в объеме  $V$ .

Простой пример для  $\frac{m}{M} = 1$ , т.е. для 1 моля:

$$p \cdot V = R \cdot T \quad (1.7a)$$

Следующий пример приведен в качестве иллюстрации соотношения между массой газа и давлением газов с различными молярными массами

(см. табл. 4, раздел 9). В объеме 10 литров при 20°C будут находиться

а) 1 г гелия

б) 1 г азота.

При использовании выражения (1.7) результаты будут таким при  $V = 10 \text{ л}$ ,  $T = 293 \text{ К}$  (20°C),  $m = 1 \text{ г}$ ,  $R = 83.14 \text{ мбар} \cdot \text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ .

В случае а), когда  $M = 4 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$  (одноатомный газ)

$$p = \frac{1 \cdot \text{г} \cdot 83.14 \cdot \text{мбар} \cdot \text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 293 \cdot \text{К}}{10 \cdot \text{л} \cdot \text{К} \cdot 4 \cdot \text{г} \cdot \text{моль}^{-1}} = 609 \text{ мбар}$$

В случае б), когда  $M = 28 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$  (двухатомный газ)

$$p = \frac{1 \cdot \text{г} \cdot 83.14 \cdot \text{мбар} \cdot \text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 293 \cdot \text{К}}{10 \cdot \text{л} \cdot \text{К} \cdot 28 \cdot \text{г} \cdot \text{моль}^{-1}} = 87 \text{ мбар}$$

Результат кажется парадоксальным, что некая масса легкого газа создает большее давление, чем такая же масса тяжелого газа. Однако, если считать, что при такой же плотности газа (выражение 1.2) в объеме будет присутствовать большее количество частиц легкого газа ( $n$  больше,  $m$  меньше), чем тяжелого газа ( $n$  меньше,  $m$  больше), то результат становится более понятным, т.е. только количество частиц  $m$  определяет давление при одинаковой температуре (выражение 1.1).

Главной задачей вакуумной технологии является уменьшение количества частиц  $n$  в данном объеме. При постоянной температуре это всегда будет означать понижение давления  $p$ . Особое внимание необходимо уделить тому, что понижение давления (в объеме) можно достичь не только те только за счет понижения количества частиц  $n$ , но и (в соответствии с выражением 1.5) за счет понижения температуры  $T$  при постоянном количестве частиц. Этот важный феномен следует всегда учитывать, если температура в объеме  $V$  неоднородна (постоянна).

В вакуумной технологии всегда используются следующие понятия и определения:

### Объем $V$ (л, м<sup>3</sup>, см<sup>3</sup>)

Термин объем используется для обозначения

а) простого геометрического, обычно известного заранее, объема вакуумной камеры или всей вакуумной системы, включая все трубопроводы и соединения (этот объем можно вычислить);

б) объема газов или паров, зависящее от давления, который, например, перемещается насосом или адсорбируется адсорбентом.



**Объемный поток (объемная скорость потока)**(л/с, м<sup>3</sup>/ч, см<sup>3</sup>/с)

Этим термином обозначается объем газа, который протекает через элемент трубопровода за единицу времени при давлении и температуре, существующих в данный момент. Здесь надо понимать, что объемный поток может быть одинаковым, но число молекул может быть разным в зависимости от давления и температуры.

**Быстрота действия (скорость откачки) S** (л/с, м<sup>3</sup>/ч, см<sup>3</sup>/с)

Быстротой действия называется объемный поток через входной порт насоса

$$S = \frac{dV}{dt} \quad (1.8a)$$

Если  $S$  остается постоянной во время процесса откачки, можно использовать отношение приращений вместо производной:

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1.8b)$$

(Таблица соотношения различных единиц измерения для быстроты действия приводится в разделе 9, табл. 6)

**Количество газа (pV) (мбарл)**

Количеством газа может обозначаться массой или весом в единицах измерения, обычно используемых для массы или веса. Однако на практике в вакуумной технологии больший интерес представляет произведение  $p \cdot V$ , чем масса или вес количества газа. Значение принимает размерность энергии и указывается в миллибарах на литр мбарл (выражение 1.7). Когда известны род газа и его температура, то можно с помощью выражения 1.7b вычислить количество газа на основе произведения  $p \cdot V$ :

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (1.7)$$

$$m = \frac{p \cdot V \cdot M}{R \cdot T} \quad (1.7.b)$$

Хотя это абсолютно некорректно, в литературе часто указывается количество газа ( $p \cdot V$ ) для различных газов. Температура газа  $T$  обычно принимается равной комнатной 293K и известной.

**Пример:**

Масса азота N<sub>2</sub> при комнатной температуре (примерно 300K) 100 мбарл составляет

$$m = \frac{100 \text{ мбар} \cdot 1 \cdot 28 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}}{83 \text{ мбар} \cdot 1 \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 300 \text{ К}} = 0.113 \text{ г}$$

По аналогии

При  $T = 300 \text{ K}$

$$1 \text{ мбар} \cdot \text{л} \text{ O}_2 = 1.28 \cdot 10^{-3} \text{ г O}_2$$

$$70 \text{ мбар} \cdot \text{л} \text{ Ar} = 1.31 \cdot 10^{-1} \text{ г Ar}$$

Количество газа, протекающее через элемент трубопровода за единицу времени в соответствие с двумя концепциями количества газа, описанных выше, можно определить двумя способами:

**Поток q<sub>m</sub>** (кг/ч, г/с)

Равен количеству газа, который протекает через элемент трубопровода за единицу времени:

$$q_m = \frac{m}{t} \quad \text{или}$$

**Поток pV q<sub>pV</sub>** (мбарл·с<sup>-1</sup>)

Поток  $p \cdot V$  является произведением давления и объема газа, протекающего через элемент трубопровода во времени:

$$q_{pV} = \frac{p \cdot V}{t} = \frac{d(p \cdot V)}{dt}$$

Поток  $p \cdot V$  измеряет расход газа.

**Производительность насоса q<sub>pV</sub>**

Производительность насоса равняется потоку газа через входной порт насоса:

$$q_m = \frac{m}{t} \quad (1.9)$$

или потоку  $p \cdot V$  (расходу) через входной порт:

$$q_{pV} = \frac{p \cdot V}{t}$$

Обычно измеряется в мбарл/с. В этом выражении  $p$  – давление на входном порту насоса. Если  $p$  и  $V$  постоянные на входном порту, производительность насоса можно представить простым выражением:

$$q_{pV} = p \cdot S \quad (1.10.a)$$

где  $S$  – быстрота действия насоса при давлении  $p$  на входном порту.

(Часто производительность насоса обозначается символом  $Q$ .)

Понятие производительности насоса является главным на практике и его не следует путать с быстротой откачки! Производительность насоса –





это количество газа, перемещающегося насосом за единицу времени, выражаемое в мбар\*л/с, а быстрота действия – это «транспортная емкость», с которой насос может работать за указанное время, измеряется в м<sup>3</sup>/ч или л/с.

Значение производительности важно при определении форвакуумного насоса относительно высоковакуумного насоса, к которому он подсоединяется последовательно чтобы гарантировать, что форвакуумный насос будет удалять газ, перемещаемый высоковакуумным насосом (см. раздел 2.32).

### Проводимость $C$ (л/с)

Расход (поток  $p \cdot V$ ) через любой элемент трубопровода (трубопровод, отверстие, клапан, сопло) определяется так

$$q_{pV} = C(p_1 - p_2) = \Delta p \cdot C \quad (1.11)$$

Здесь  $\Delta p = (p_1 - p_2)$  – перепад между давлениями в начале и конце элемента трубопровода. Коэффициент пропорциональности  $C$  называется проводимостью. Он определяется геометрией трубопровода, и его легко вычислить для некоторых простых конфигураций (см. раздел 1.5).

В области высокого и сверхвысокого вакуума  $C$  является константой, которая не зависит от давления. В областях низкого и среднего вакуума  $C$ , напротив, зависит от давления. Поэтому, расчет проводимости  $C$  элементов трубопроводов должен выполняться по отдельности для каждого отдельного диапазона давления (подробная информация приведена в разделе 1.5).

Из определения объемного потока можно так же определить что: Проводимость  $C$  является объемным потоком через элемент трубопровода. Выражение (1.11) можно считать законом Ома для вакуумной технологии, в котором  $q_{pV}$  соответствует току,  $\Delta p$  – напряжению, а  $C$  – значению электрической проводимости. По аналогии с законом Ома для электричества сопротивление потока

$$R = \frac{1}{C}$$

вводится как обратное значение проводимости. Тогда выражение (1.11) можно переписать в следующем виде

$$q_{pV} = \frac{1}{R} \cdot \Delta p \quad (1.12)$$

Для последовательно соединенных элементов применимо следующее:

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3 + K \quad (1.13)$$

При параллельном соединении используется выражение:

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + K \quad (1.13a)$$

### Течь (поток течи) $q_L$ (мбар·л/с)

В соответствии с сформулированными выше определениями, легко понять, что размер течи, т.е. движение через элемент трубопровода будет так же измеряться в мбар·л/с. течь часто определяется или измеряется когда с одной стороны действует атмосферное давление, а с другой – вакуум (давление  $p < 1$  мбар). Если гелий (который может использоваться в качестве пробного газа) проходит через течь при таких условиях, то их считают стандартными условиями по гелию.

### Обезгаживание (мбар·л)

Термин обезгаживания означает высвобождение газов и паров из стенок вакуумной камеры и других компонентов внутри вакуумной системы. Это количество газа так же характеризуется произведением  $p \cdot V$ , где  $V$  – объем, в котором происходит высвобождение газа, а  $p$ , лучше  $\Delta p$  – повышение давления в результате попадания этого газа в указанный объем.

### Скорость обезгаживания (мбар·л/с)

Это обезгаживание за период времени, выражаемое в мбар·л/с

### Скорость обезгаживания (мбар·л·с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>) (относительно поверхности)

Чтобы определить количество газа, которое может высвободиться в течение времени, важно знать размер площади внутренней поверхности, материал и характеристики поверхности

### Длина свободного пути молекулы $\lambda$ (см) и частота соударений $z$ (с<sup>-1</sup>)

Концепция, что газ состоит из большого числа отдельных молекул, между которыми, помимо столкновений, нет эффективных взаимодействий, является основой теоретических предположений, которые сегодня мы называем кинетической теорией газа.

Одним из первых и в тоже время наиболее полезным результатом этой теории является расчет давления газа  $p$  как функция от плотности газа и среднеквадратической скорости  $c^2$  для отдельных молекул газа с массой молекулы  $m_T$ :

$$p = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \overline{c^2} = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m_T \cdot \overline{c^2} \quad (1.14)$$

где



$$\overline{c^2} = 3 \cdot \frac{k \cdot T}{m_T} \quad (1.15)$$

Молекулы газа свободно летают и ударяются друг с другом и со стенками камеры при различных возможных скоростях. Движение молекул газа описывается численным методом с учетом кинетической теории газов. Среднее количество соударений молекул в течение заданного периода, так называемая частота соударений  $z$ , и расстояние, которое молекула преодолевает между соударениями, так называемая длина свободного пути  $\lambda$ , описываются ниже как функция средней скорости молекул  $\overline{C}$ , диаметра молекулы  $2r$  и количества молекул газа  $n$  – как очень хорошая аппроксимация:

$$Z = \frac{\overline{C}}{\lambda} \quad (1.16)$$

где 
$$\overline{C} = \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T}{\pi \cdot m_T}} = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}} \quad (1.17)$$

и 
$$\lambda = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot n \cdot (2r)^2} \quad (1.18)$$

Таким образом, длина свободного пути  $\lambda$  для количества молекул  $n$  в соответствии с выражением (1.1) обратно пропорциональна давлению  $p$ . То есть, при постоянной температуре выполняемо следующее выражение для каждого газа

$$\lambda \cdot p = const \quad (1.19)$$

Используемая для расчетов длина свободного пути  $\lambda$  для опорного давления и различных газов приведена в табл.3 и рис.9.1 в разделе 9. Наиболее важные выражения из кинетической теории газов, используемые в вакуумной технологии, приведены в табл. 4, раздел 9.

#### Скорость соударения $z_A$ ( $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) и время образования монослоя $\tau$ (с)

Наиболее часто для характеристики состояния давления в области высокого вакуума используется расчет времени, необходимого для формирования одномолекулярного или одноатомного слоя на свободной от газов поверхности при предположении, что каждая молекула останется на поверхности. Время формирования монослоя связано с так называемой скоростью соударения  $Z_A$ . Для газа в состоянии покоя скорость соударения будет означать количество молекул, которые соударяются с поверхностью внутри вакуумной камеры за единицу времени:

$$Z_A = \frac{n \cdot \overline{C}}{4} \quad (1.20)$$

Если  $a$  – расстояние до единицы поверхности, на которую может оседать газ, тогда время формирования монослоя:

$$\tau = \frac{a}{Z_A} = \frac{4 \cdot a}{n \cdot \overline{C}} \quad (1.21)$$

#### Частота соударений $z_V$ ( $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ )

Равняется произведению количества соударений  $z$  на половину количества молекул  $n$ , т.к. соударение двух молекул считается как одно соударение:

$$Z_V = \frac{n}{2} \cdot Z \quad (1.21a)$$

## 1.2 Атмосферный воздух

Перед откачкой каждая вакуумная система содержит атмосферный воздух, который всегда окружает ее во время работы. Поэтому необходимо знать физические и химические свойства атмосферного воздуха.

Воздух состоит из нескольких газов и паров воды около поверхности. Давление, создаваемое атмосферным воздухом, отсчитывается от уровня моря. Среднее атмосферное давление равняется 1013 мбар (эквивалент «атмосфере», единице измерения, использовавшейся ранее). В табл. 8 в разделе 9 приведен состав стандартного атмосферного воздуха при относительной влажности 50% и температуре 20°C. Относительно атмосферного воздуха в вакуумной технологии приняты следующие замечания:

а) водяной пар в зависимости от влажности играет важную роль при откачке вакуумных систем (см. раздел 2.2.3).

б) при откачке с использованием сорбционного насоса следует учитывать количество аргона (раздел 2.1.8).

с) несмотря на небольшое количество гелия в атмосфере, только 5 ppm, этот газ сильно проявляет себя в сверхвысоковакуумных системах, имеющих уплотнения из Витона, или содержащих кварцевые компоненты. Гелий может проникать через эти компоненты до измеряемого уровня.

Давление атмосферного воздуха падает при повышении высоты над уровнем поверхности земли (см. рис.9.3, раздел 9). На высоте пример 100 км превалирует высокий вакуум, а на высоте свыше 400 км - сверхвысокий вакуум. Состав воздуха так же изменяется при изменении высо-



ты над поверхностью земли (см. рис.9.4, раздел 9).

## 1.3 Газовые законы и модели

### 1.3.1 Теория сплошной среды

Концепция модели: газ «жидкий» (как жидкость) и течение его аналогично течению жидкости. Теория сплошной среды и обобщенные газовые законы основаны на экспериментах и объясняют все процессы в газах при давлении, близком к атмосферному. Только после того, как стало возможным использование улучшенных вакуумных насосов для разрежения воздуха и увеличения длины свободного пути почти до размеров камеры, были приняты дальнейшие допущения для кинетической теории газов. Кинетическая теория газов применима в любом диапазоне давлений. Теория сплошной среды представляет отдельный случай (исторически более ранний) газовых законов под действием атмосферы.

**Важнейшие газовые законы (теория сплошной среды)**

**Закон Бойля-Мариотта**

$$p \cdot V = const$$

для  $T = const$  (изотерма)

**Закон Гей-Люсака**

$$V = V_0(1 + \beta \cdot t)$$

для  $p = const$  (изобара)

**Закон Амонтонна**

$$p = p_0(1 + \gamma \cdot t)$$

для  $V = const$  (изохора)

**Закон Дальтона**

$$\sum_i p_i = p_{total}$$

**Закон Пуассона**

$$p \cdot V^K = const$$

(адиабата)

**Закон Авогадро**

$$\frac{m_1}{V_1} / \frac{m_2}{V_2} = \frac{M_1}{M_2}$$

**Закон идеального газа**

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T = \nu \cdot R \cdot T$$

Также известно как **Уравнение состояния идеального газа** (согласно теории непрерывности)

**Уравнение Ван дер Ваальса**

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right) \cdot (V_m - b) = R \cdot T$$

$a, b$  – постоянные,  $V_m$  – молярный объем

Также известно как **Уравнение состояния реального газа**

**Уравнение Клауса-Клапейрона**

$$L = T \cdot \frac{dp}{dT} \cdot (V_{m,v} - V_{m,l})$$

$L$  – энтальпия испарения,

$T$  – температура испарения,

$V_{m,v}, V_{m,l}$  – молярные объемы пара и жидкости

### 1.3.2 Кинетическая теория газов

С учетом атомного строения мира и необходимости изучения сильно разреженных газов (где нет сплошной среды) была разработана кинетическая теория газа. Использование теории возможно не только для получения законов идеального газа другим методом, но так же вычисления многих других величин, включающих кинетику газа – таких как частота соударений, длина свободного пути, время формирования монослоя, постоянных диффузий и других величин.

**Концепция модели и основные предположения:**

1. атомы/молекулы считаются точками.
2. усилия передаются от одной молекулы к другой только при соударении.
3. соударения упругие.
4. превалирует случайное движение молекул.

Эта простая модель была разработана Кренигом (Kronig). В кубе находятся  $N$  частиц, одна шестая которых движется по направлению к стенке куба. Если длина грани куба 1 см, то в нем будет содержаться  $n$  частиц (количество частиц). В течение времени  $n \cdot c \cdot \Delta t / 6$  молекул достигнут каждой стенки, где импульс молекулы изменится из-за изменения направления на  $180^\circ$  и будет равен  $2 \cdot m_T \cdot c$ . Сумма изменений импульсов для всех молекул, сталкивающихся со стенками приведет к усилию на стенках или давлению,



действующему на стенки, на единицу площади поверхности:

$$\frac{n}{6} \cdot c \cdot 2 \cdot m_T \cdot c = \frac{1}{3} \cdot n \cdot c^2 \cdot m_T = p$$

где  $n = \frac{N}{V}$

Отсюда получаем

$$p \cdot V = \frac{1}{3} \cdot N \cdot m_T \cdot c^2$$

**Закон идеального газа** (полученный из кинетической теории газа)

Если заменить  $c^2$  на  $\overline{c^2}$ , то сравнение этих двух основных уравнений покажет:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T = \frac{1}{3} \cdot N \cdot m_T \cdot \overline{c^2} \quad \text{или}$$

$$p \cdot V = N \cdot \left( \frac{m_T \cdot R}{M} \right) \cdot T = \frac{2}{3} \cdot N \cdot \left( \frac{m_T \cdot c^2}{2} \right)$$

Выражение в скобках с левой стороны является постоянной Больцмана  $k$ , что с правой стороны соответствует кинетической энергии молекул:

Постоянная Больцмана

$$k = \frac{m_T \cdot R}{M} = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$$

Кинетическая энергия молекул

$$\overline{E_{kin}} = \frac{m_T \cdot \overline{c^2}}{2}$$

т.е.

$$p \cdot V = N \cdot k \cdot T = \frac{2}{3} \cdot N \cdot \overline{E_{kin}}$$

В этом виде уравнение обеспечивает газокинетическое определение температуры.

Масса молекулы равняется

$$m_T = \frac{M}{N_A} = \frac{\text{масса / моль}}{\text{число молекул / моль}}$$

где  $N_A$  – число Авогадро (ранее - число Лощмидта).

Число Авогадро

$$N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Для 1 моля  $\frac{m_T}{M} = 1$  и  $V = V_m = 22.414 \text{ л}$  (молярный объем).

Из закона идеального газа при стандартных условиях ( $T = 273.15 \text{ K}$ ,  $p_n = 1013.25 \text{ мбар}$ ):

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

Для основной газовой постоянной

$$R = \frac{1013.25 \text{ мбар} \cdot 22.4 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1}}{273.15 \text{ K}} = 83.14 \frac{\text{мбар} \cdot \text{л}}{\text{моль} \cdot \text{K}}$$

## 1.4 Диапазоны давления в вакуумной технологии и их характеристики

См. табл. 9 в разделе 9. В вакуумной технологии принято подразделять весь диапазон давлений, который содержит более 16 порядков, на небольшие отдельные области. Обычно выделяют следующие области:

Низкий вакуум	1000-1 мбар
Средний вакуум	$1 \cdot 10^{-3}$ мбар
Высокий вакуум	$10^{-3} \cdot 10^{-7}$ мбар
Сверхвысокий вакуум	$10^{-7} \cdot 10^{-14}$ мбар

Это деление, естественно, произвольное. Для химической промышленности большой интерес могут представлять давления в диапазоне 100-1 мбар в качестве среднего вакуума. В некоторых отраслях промышленности термин «вакуум» не используется, а оперируют понятиями «низкое/отрицательное давление». Указанные области давления могут, однако, достаточно удовлетворительно очертить кинетическое состояние газа и природу потока газа. Технологии работы в каждой из областей будут, конечно же, различными.

## 1.5 Типы потоков и проводимость

В вакуумной технологии используются три типа режимов течения: вязкостный (или непрерывный поток), молекулярный и промежуточный (молекулярно-вязкостный), называемый режимом Кнудсена.



## 1.5.1 Режимы течения

### Вязкостный режим течения (непрерывный поток)

В области низкого вакуума присутствует только этот режим течения газа. Характер этого типа потока определяется взаимодействием молекул. В следствие внутреннего трения, вязкость потока является главным фактором. Если в потоке появляются завихрения, можно говорить о **турбулентном потоке**. Если различные слои потока перемещаются (сдвигаются) относительно друг друга, то для такой поток называется ламинарным.

Ламинарный поток в трубе круглого сечения с параболическим распределением скорости называется **потоком Пуазеля**. Этот тип потока встречается наиболее часто в вакуумной технологии. Вязкостный поток обычно присутствует тогда, когда длина свободного пути значительно меньше диаметра трубопровода  $\lambda \ll d$ .

Количественной характеристикой, описывающей состояние вязкостного потока, является число Рейнольдса  $Re$ .

$Re$  является произведением диаметра трубопровода, скорости потока, плотности и обратной величины вязкости (внутреннего трения) текущего газа. Если  $Re > 2200$ , то поток турбулентный, а если  $Re < 2200$ , то поток ламинарный.

При вязкостном режиме течения может наблюдаться явление **подавления (закупорки) потока**. Это явление играет роль при напуске и откачке вакуумной камеры, когда есть течи.

Газ всегда будет течь там, где есть перепад давления  $\Delta p = (p_1 - p_2) > 0$ . Интенсивность потока газа, т.е. расход газа во времени повышается с перепадом давления. Однако в случае вязкостного режима это возможно только в случае пока скорость потока, которая так же возрастет, не достигнет скорости звука. Это всегда происходит при некотором перепаде давления, значение которого можно охарактеризовать как «критическое»:

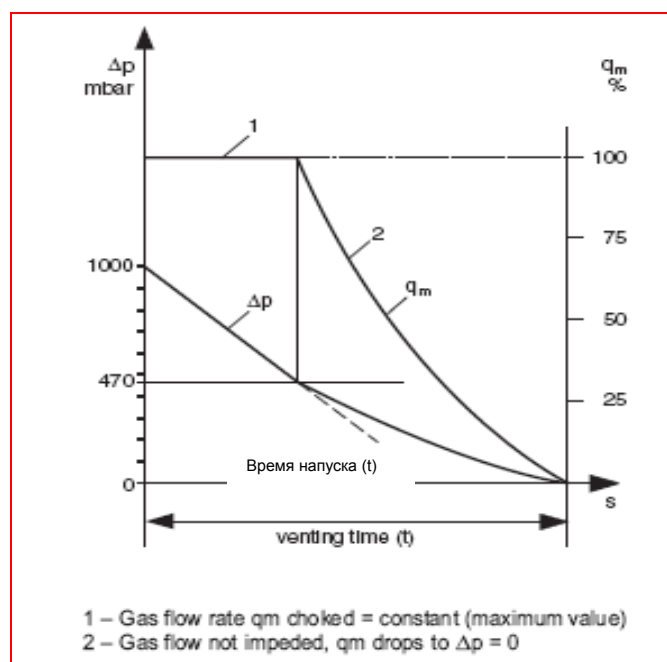
$$\Delta p_{crit} = p_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{crit} \right] \quad (1.22)$$

Дальнейшее повышение перепада давления  $\Delta p > \Delta p_{crit}$  не приведет к увеличению потока газа, любое повышение уже не допустимо. Для воздуха при температуре 20°C критическое значение по теории динамики газов:

$$\left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{crit} = 0.528 \quad (1.23)$$

На графике на рис. 1.1 схематично представлен напуск откаченной камеры через открытый клапан напуска, через который подается воздух под давлением  $p = 1000$  мбар. В соответствии с представленной выше информацией, результирующее критическое давление:

$\Delta p_{crit} = 1000 \cdot (1 - 0.528) \text{ мбар} \approx 470 \text{ мбар}$ , т.е. когда  $\Delta p > 470 \text{ мбар}$ , поток будет подавляться, а когда  $\Delta p < 470 \text{ мбар}$ , поток газа будет спадать.



1. поток газа подавлен/постоянен  $q_m$  (максимальное значение).
2. нет препятствий для потока газа, поток  $q_m$  падает до  $\Delta p = 0$ .

Рисунок 1.1 Напуск откаченной камеры

### Молекулярный режим течения

Молекулярный режим течения превалирует в высоком и сверхвысоком вакууме. В этих областях вакуума молекулы могут свободно двигаться, не влияя друг на друга. Молекулярный режим существует тогда, когда длина свободного пути частиц много больше диаметра трубопровода  $\lambda \gg d$ .

### Режим Кнудсена (молекулярно-вязкостный)

Промежуточный режим течения между вязкостным и молекулярным называется режимом Кнудсена. Он существует в области среднего вакуума, когда  $\lambda \approx d$ .

Произведение давления  $p$  и диаметра трубопровода  $d$  для данного газа при указанной температуре может служить характеристикой для различных режимов течения. Используя значе-

ния из табл. 3, раздел 9, для воздуха при 20°C можно получить следующие соотношения:

при 1	мбар	$10^{-2}$
при $10^{-6}$	мбар	$10^{+4}$
при $10^{-11}$	мбар	$10^{+9}$

### Низкий вакуум – вязкостный режим течения

$$\lambda < \frac{d}{100} \Leftrightarrow p \cdot d > 6.0 \cdot 10^{-1} \text{ мбар} \cdot \text{см}$$

### Средний вакуум – режим Кнудсена

$$\frac{d}{100} < \lambda < \frac{d}{2} \Leftrightarrow 6 \cdot 10^{-1} > p \cdot d > 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ мбар} \cdot \text{см}$$

### Высокий и сверхвысокий вакуум – молекулярный режим

$$\lambda > \frac{d}{2} \Leftrightarrow p \cdot d < 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ мбар} \cdot \text{см}$$

При вязкостном режиме течения предпочтительное направление скорости для всех молекул газа будет идентично общему направлению потока газа. Это выравнивание подтверждается тем фактом, что частички газа находятся близко друг к другу и соударяются между собой чаще, чем со стенками камеры. Общая скорость газа является «групповой/ обобщенной» скоростью и не равняется «тепловой» скорости молекул газа.

С другой стороны при молекулярном режиме течения преобладает столкновение частиц со стенками. В результате отражения (а так же десорбции со стенок камеры в течении некоторого периода) частички газа в высоком вакууме могут двигаться в любом направлении, поэтому дальше говорить о потоке в общепринятом смысле невозможно.

В этом случае можно попытаться объяснить диапазоны давления как функцию геометрического положения. Пределы для каждого из диапазонов давления (табл. 9 в разделе 9) выбираются таким образом, чтобы при работе на типовом лабораторном оборудовании в области низкого вакуума доминировало столкновение частиц газа между собой, тогда как в области высокого и сверхвысокого вакуума доминировали столкновения частиц со стенками.

В областях высокого и сверхвысокого вакуума свойства стенок вакуумной камеры будут иметь важное значение при давлении ниже  $10^{-3}$  мбар, когда на стенках камеры может оказаться больше молекул чем в ней самой. Если считать, что на внутренней стенке сферической камеры объемом 1 л адсорбирован мономолекулярный слой, тогда отношение числа адсорбированных молекул к числу свободных молекул в объеме будет:

По этой причине время формирования монослоя  $t$  (раздел 1.1) используется для характеристики сверхвысокого вакуума и выделения этой области из области высокого вакуума. Время образования монослоя  $\tau$  равняется только доле секунды в области высокого вакуума, в то время как в области сверхвысокого вакуума, оно может увеличиваться до минут и часов. Поэтому свободные от газов поверхности можно получить (и сохранять в течение длительного периода) только в условиях сверхвысокого вакуума.

Другие физические свойства изменяются с изменением давления. Например, теплопроводность и внутреннее трение в газах в области среднего вакуума сильно зависят от давления. В областях низкого и высокого вакуума эти свойства, напротив, кажутся независимыми от давления.

Поэтому, в различных областях вакуума необходимо использовать не только различные насосы, но и вакуумметры. Наглядная схема выбора насосов и средств измерения для различных диапазонов давления показана на рис. 9.16 и 9.16а в разделе 9.

## 1.5.2 Расчет проводимости

Эффективная быстрота действия, необходимая для откачки камеры или выполнения технологического процесса внутри вакуумной системы будет соответствовать входной скорости отдельного насоса (или системы откачки) только если насос подсоединен прямо к откачиваемой камере или системе. Т.е. это возможно в очень редких случаях. Почти всегда необходимо учитывать промежуточные трубопроводы, клапаны, затворы, ловушки и т.п. Все эти компоненты создают сопротивление потоку, следствием чего будет тот факт, что эффективная быстрота действия  $S_{eff}$  всегда меньше быстроты действия  $S$  насоса или системы откачки. Т.е. чтобы гарантировать необходимую эффективную быстроту действия в вакуумной камере, необходимо выбрать насос с большей быстротой действия. Соотношение между  $S_{eff}$  и  $S$  определяется следующим основным уравнением:

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{C} \quad (1.24)$$

Здесь  $C$  – общая проводимость системы трубопроводов, состоящая из отдельных значений проводимости для каждого из компонентов (клапаны, ловушки, затворы), соединенных последовательно:



$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + K \frac{1}{C_n} \quad (1.25)$$

Уравнение (1.24) показывает, что только в случае, когда  $C = \infty$  (т.е. сопротивление потоку равно 0),  $S = S_{eff}$ . В вакуумной технологии существует ряд полезных выражений для расчета проводимости  $C$  для сечения трубопровода. Проводимость клапанов, ловушек, затворов, сепараторов, как правило, определяется эмпирически.

Следует отметить, что проводимость вакуумных компонентов в основном не является постоянным значениям, а зависит от существующего уровня вакуума, сильно зависит от режима течения газа (вязкостный или молекулярный, см. ниже) и давления. Поэтому, при выполнении расчетов проводимости в вакуумной технологии, всегда необходимо обращать внимание на тот факт, что могут использоваться только значения проводимости, применимые для указанного диапазона давления.

### 1.5.3 Проводимость трубопроводов и отверстий

Проводимость зависит не только давления и рода газа, то так же и от поперечного сечения конструктивного элемента (круглое, эллиптическое). Другими факторами являются длина элемента и форма (прямой или изогнутый). В результате получают различные выражения, необходимые для расчетов в различных ситуациях.

1) **проводимость прямого трубопровода**, длиной  $l$  круглого сечения диаметром  $d$  для ламинарного, молекулярного режима и режима Кнудсена по воздуху при 20°C (уравнение Кнудсена):

$$C = 135 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p} + 12.1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \frac{1 + 192 \cdot d \cdot \bar{p}}{1 + 237 \cdot d \cdot \bar{p}} \quad \text{л/с} \quad (1.26)$$

где 
$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$$

$d$  - внутренний диаметр трубопровода (см),

$l$  - длина трубопровода (см) ( $l \geq 10d$ ),

$p_1$  - давление в начале трубопровода (по направлению потока, мбар),

$p_2$  - давление в конце трубопровода (по направлению потока, мбар).

Если переписать вторую часть в уравнении (1.26) в следующем виде:

$$C = 12.1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot f(d \cdot \bar{p}) \quad (1.26.a)$$

и

$$f(d \cdot \bar{p}) = \frac{1 + 203 \cdot d \cdot \bar{p} + 2.78 \cdot 10^3 \cdot d^2 \cdot \bar{p}^2}{1 + 237 \cdot d \cdot \bar{p}} \quad (1.27)$$

Можно выделить два важных ограничения из функции  $f(d \cdot \bar{p})$ :

**Ограничение для ламинарного потока (режима течения)**

$$(d \cdot \bar{p} > 6 \cdot 10^{-1} \text{ мбар} \cdot \text{см})$$

$$C = 135 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p} \quad \text{л/с} \quad (1.28.a)$$

**Ограничение для молекулярного режима течения**

$$(d \cdot \bar{p} < 10^{-2} \text{ мбар} \cdot \text{см})$$

$$C = 12.1 \cdot \frac{d^3}{l} \quad \text{л/с} \quad (1.28.b)$$

**При молекулярном режиме течения проводимость не зависит от давления!**

Уравнение Кнудсена в полном виде (1.26) будет использоваться для промежуточной области  $10^{-2} < d \cdot \bar{p} < 6 \cdot 10^{-1} \text{ мбар} \cdot \text{см}$ . Значения проводимостей для прямого трубопровода стандартного номинального диаметра приведены на рис. 9.5 (ламинарный режим) и рис. 9.6 (молекулярный режим) в разделе 9. В разделе 9 так же приводятся дополнительные номограммы для определения проводимости (рис. 9.8 и 9.9).

2) **проводимость отверстия** (площадь отверстия  $A$  см<sup>2</sup>)

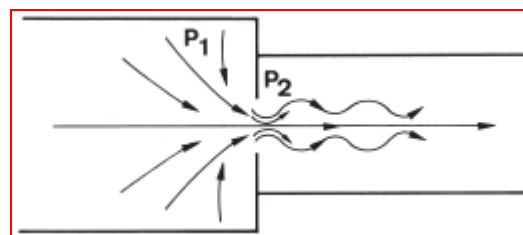


Рисунок 1.2. поток газа через отверстие (A) при высоком давлении (ламинарный режим течения)

Проводимость для вязкостного режима течения по воздуху при 20°C, когда  $p_2/p_1 = \delta$ :

для  $\delta \geq 0.528$  (1.29)

$$C_{visc} = 76.6 \cdot \delta^{0.712} \cdot \sqrt{1 - \delta^{0.288}} \cdot \frac{A}{1 - \delta} \quad \text{л/с}$$



для  $\delta \leq 0.528$  (1.29a)

$$C_{visc} = 20 \cdot \frac{A}{1-\delta} \frac{l}{c}$$

для  $\delta \leq 0.03$  (1.29b)

$$C_{visc} = 20 \cdot A \frac{l}{c}$$

где  $\delta = 0.528$  – критическое давление для воздуха

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{crit}$$

При  $\delta < 0.528$  происходит закупорка потока, поток становится постоянным. При молекулярном режиме течения (при высоком вакууме) для воздуха применимо следующее выражение:

$$C_{mol} = 11.6 \cdot A \cdot l \cdot s^{-1} \quad (A \text{ в см}^2) \quad (1.30)$$

Данные на рис.1.3 быстроты действия  $S_{visc}^*$  и  $S_{mol}^*$  являются зависимостями от площади отверстия  $A$  и отношения давлений  $p_2/p_1 = \delta$ . Значения приведены для воздуха при 20°C. В основном уравнении следует учитывать молярные массы текущего газа (здесь не показаны).

При работе с другими газами необходимо умножить выражение для проводимости по воздуху на коэффициент, приведенный в табл. 1.1.

Газ (20 °C)	Молекулярный режим	Ламинарный режим
Воздух	1.00	1.00
Кислород	0.947	0.91
Неон	1.013	1.05
Гелий	2.64	0.92
Водород	3.77	2.07
Углекислый газ	0.808	1.26
Пары воды	1.263	1.73

Таблица 1.1. Коэффициент соответствия

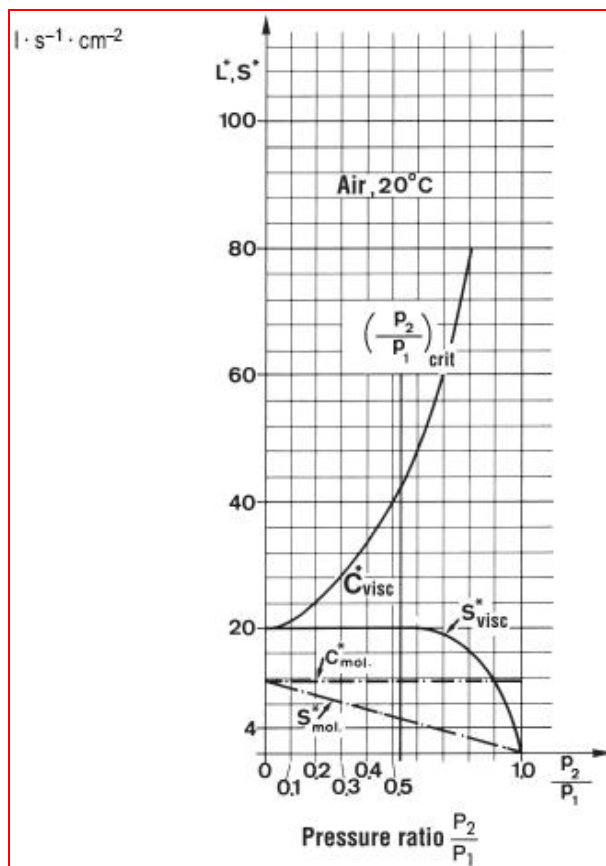


Рисунок 1.3. Зависимость проводимости от площади,  $S_{visc}^*$  и  $S_{mol}^*$  являются зависимостями от площади отверстия  $A$  и отношения давлений  $p_2/p_1 = \delta$  для воздуха при 20°C.

#### Определение проводимости по номограмме

Проводимость трубопроводов, отверстий по воздуху или другим газам можно определить с помощью номограмм. Этим методом можно определить не только значение проводимости для указанных значений длины, диаметра и давления, но и диаметр трубопровода, необходимый тогда, когда насосом будет достигнута эффективная быстрота действия при данном давлении и длине трубопровода. Так же можно определить максимальную допустимую длину трубопровода, если известны другие параметры. Полученные значения обычно не применимы для турбулентного режима течения. В сомнительных ситуациях следует определить число Рейнольдса (раздел 1.5), используя приблизительное выражение

$$Re = 15 \cdot \frac{q_{pV}}{d} \quad (1.31)$$

Здесь  $q_{pV} = S \cdot p$  – это выходящий поток (мбар·л/с),  $d$  – диаметр трубопровода (см). Номограммы, которые могут понадобиться на практике, приведены в разделе 9.





### 1.5.4 Проводимость других элементов

Когда трубопровод содержит колена или изгибы (угловые клапаны), можно вычислить наибольшую эффективную длину  $l_{eff}$  трубопровода. Используется следующее выражение:

$$l_{eff} = l_{axial} + 1.33 \cdot \frac{\theta}{180^\circ} \cdot d \quad (1.32)$$

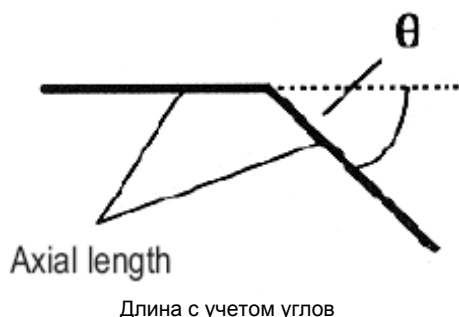
где

$l_{axial}$  – длина трубопровода с учетом углов (см),

$l_{eff}$  – эффективная длина трубопровода (см),

$d$  – внутренний диаметр трубопровода (см),

$\theta$  – угол изгиба ( $^\circ$ ).



Технические характеристики в каталоге продукции компании Leybold содержат значения проводимостей для пароизоляции, ловушек (заливных и адсорбционных) и клапанов для молекулярного режима течения. При высоких давлениях, т.е. при ламинарном режиме и режиме Кнудсена, клапаны будут иметь ту же проводимость, что и трубопроводы с соответствующим номинальным диаметром и длиной с учетом угла. Для углового клапана необходимо использовать расчет проводимости колена.

В случае использования фильтров для защиты от пыли насосов с газобалластом или насосов Рутса, в каталоге представлены проценты снижения для различных диапазонов давления. Другие компоненты, в частности конденсаторы и сепараторы, проектируются так, чтобы они не снижали быстроту действия на заметную величину.

Следующее замечание следует использовать как правило для определения размеров вакуумных трубопроводов: **Трубопроводы должны быть как можно короче и как можно шире.** Они должны иметь как минимум сечение такого же размера, что и входной порт насоса. Если обстоятельства не позволяют укорачивать трубопровод всасывания (входного трубопровода насоса), когда это желательно и с экономической и инженерной точек зрения, рекомендуется устанавливать насос Рутса в трубопровод всасывания, который работает как подающий газ насос, что снизит сопротивление трубопровода.

## 2 Создание вакуума

### 2.1 Вакуумные насосы: обзор

Вакуумные насосы используются для понижения давления газа в объеме и, таким образом, плотности газа (см. выражение 1.5). Рассмотрим частицы газа, удаляемые из объема. Выделяются два класса вакуумных насосов по принципу удаления частиц:

- a) вакуумные насосы, в которых через одну или несколько ступеней компрессии частицы газа удаляются из откачиваемого объема и попадают в атмосферу (компрессионные насосы). Частички газа откачиваются за счет перемещения или передачи импульса.
- b) вакуумные насосы, в которых частицы газа удаляются с помощью конденсации или другим путем (т.е. химически) осаждаются на поверхности, являющейся границей этого объема.

Классификация, которая более совпадает с реальным и практическим применением, подразделяет следующие типы насосов, в которых выделяются три класса компрессионных насосов и два класса конденсационных и геттерных насосов:

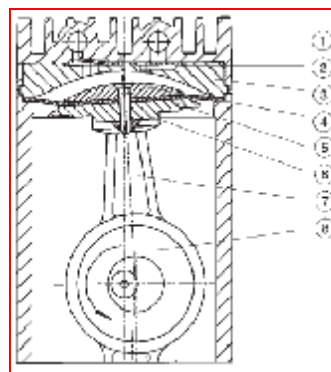
1. Насосы, которые работают с периодическим увеличением и уменьшением камер насоса (пластинчато-роторные, плунжерные, поршневые).
2. Насосы, которые переносят количество газа со стороны низкого давления к высокому давлению без изменения объема камер насоса (насосы Рутса и турбомолекулярные).
3. Насосы, в которых откачка базируется на процессах диффузии газов в поток пара с высокой скоростью (пароструйные насосы).
4. Насосы, которые откачивают пары за счет конденсации (конденсаторы) газа и насосы, которые откачивают газы за счет конденсации их при низких температурах (крионасосы).
5. Насосы, которые поглощают газы за счет адсорбции или абсорбции на поверхности, свободной от газов (сорбционные насосы).

Обзор вакуумных насосов приведен в табл. 2.1.

### 2.1.1 Объемные (механические) вакуумные насосы

#### 2.1.1.1 Диафрагменные насосы

В последнее время диафрагменные насосы стали занимать все более важное место, особенно по экологическим причинам. Они являются альтернативой пароструйным вакуумным насосам, т.к. они не загрязняют воды. С другой стороны, диафрагменные вакуумные насосы могут снизить расходы на эксплуатацию на почти 90% по сравнению с пароструйными насосами. По сравнению с пластинчато-роторными насосами, откачивающие камеры диафрагменных насосов не содержат масла. По конструкции им не требуются масляные уплотнения валов. Диафрагменные вакуумные насосы являются одно- или многоступенчатыми сухими компрессионными вакуумными насосами (могут иметь до четырех ступеней). Здесь замкнутая диафрагма натянута между поршнем и стенками корпуса (рис.2.1). Она совершает колебательные движения за счет соединения со штоком и эксцентриком. Откачивающие или компрессионные камеры, объем которых периодически увеличивается и уменьшается, создают откачивающее усилие. Клапаны установлены в таком порядке, чтобы во время фазы, когда объем камеры увеличивается, они открывались во входной трубопровод. Во время сжатия откачивающая камера соединена с выхлопным трубопроводом. Диафрагма обеспечивает герметичное уплотнение между камерой привода и откачивающей камерой так, что она остается чистой от масла и смазочных материалов (сухой компрессионный вакуумный насос). Только диафрагма и клапаны контактируют с откачиваемой средой. Если на диафрагму нанесено покрытие из тефлона PTFE, а входные и выхлопные клапаны изготовлены из таких высокофторированных эластомеров как DIVAC производства LEYBOLD, тогда насос может использоваться для откачки агрессивных газов и паров и для вакуумных процессов в химических лабораториях.



- |                   |                        |
|-------------------|------------------------|
| 1. крышка корпуса | 5. диафрагма           |
| 2. клапаны        | 6. поддерживающий диск |
| 3. крышка         | 7. соединительный шток |
| 4. диск диафрагмы | 8. эксцентрик          |

Рисунок 2.1. Конструкция ступени диафрагменного насоса (Vacuubrand)

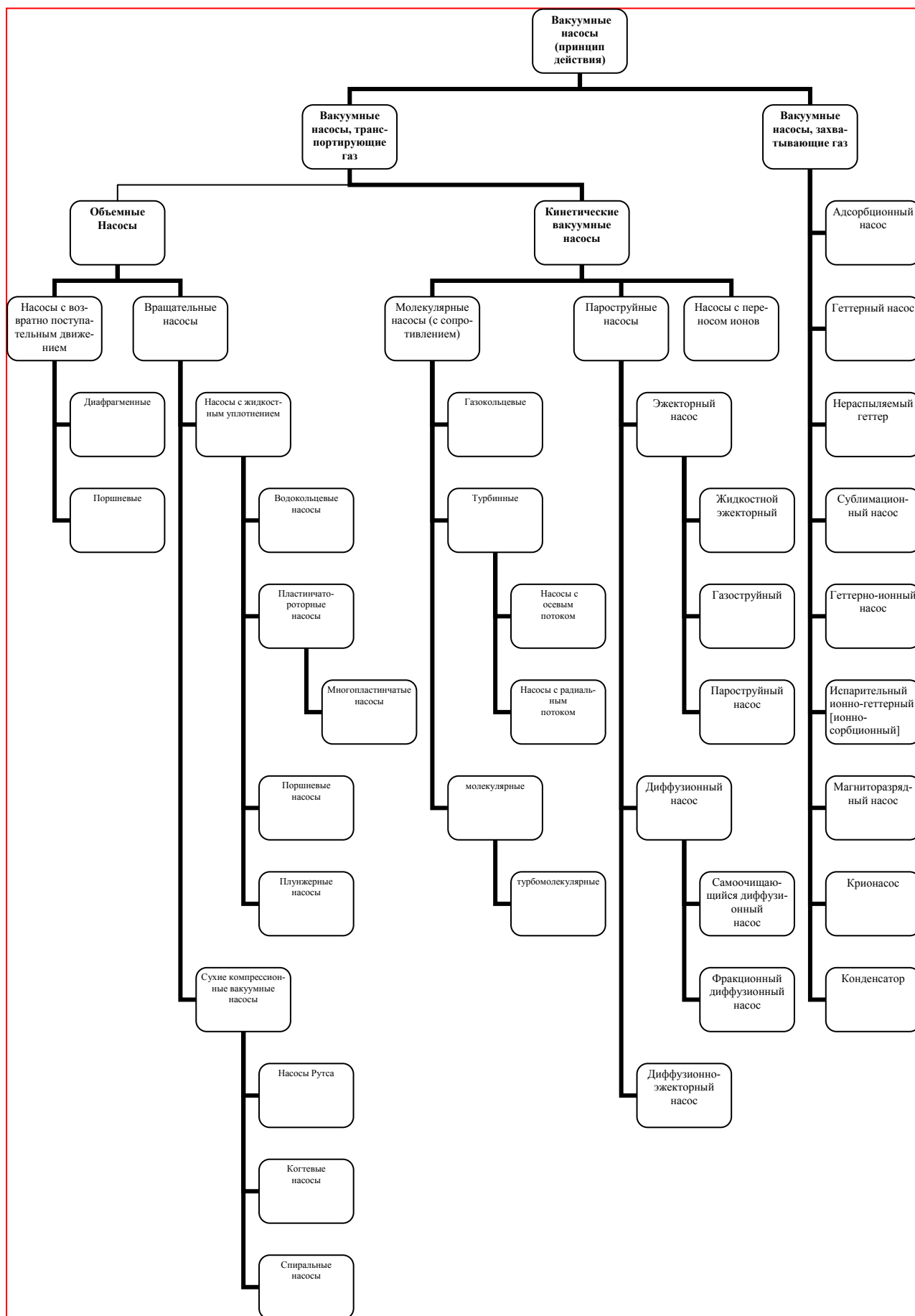
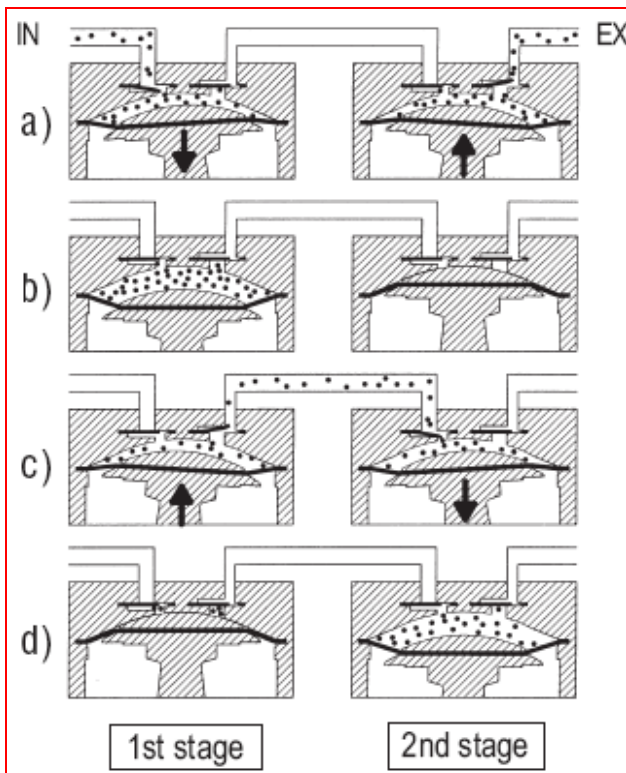


Таблица 2.1. Классификация вакуумных насосов



Из-за ограниченной эластичной деформации диафрагмы можно получить небольшие скорости откачки. При данном принципе откачки объем, сверху остается объем (вредное пространство), из которого газы не могут попасть в выхлопной трубопровод. Количество газа, которое остается при выпускном давлении попадает в откачивающую камеру при следующем всасывании и заполняет ее, поэтому т.к. входное давление ухудшается, количество поступающего газа уменьшается все больше и больше. По этой причине объемная эффективность постоянно ухудшается. Диафрагменные вакуумные насосы не могут обеспечить большой коэффициент компрессии, чем соотношение между вредным пространством и максимальным объемом откачивающей камеры. Для одноступенчатых диафрагменных насосов предельное давление составляет примерно 80 мбар. Двухступенчатые насосы, такие как DI-AVAC производства LEYBOLD могут создавать давление 10 мбар (рис. 2.2), трехступенчатые – около 2 мбар, а четырехступенчатые могут создавать почти  $5 \cdot 10^{-1}$  мбар.



Открытие и закрытие клапанов, проходов и откачного механизма во время 4-х последовательных фаз поворота соединительного штока (a-d)

Рисунок 2.2. принцип работы двухступенчатого диафрагменного насоса (Vacuubrand)

Диафрагменные насосы, обеспечивающие такое предельное давление подходят в качестве насосов предварительной откачки (форвакуумных) для турбомолекулярных насосов с полностью интегрированной спиральной ступенью (гибридные или турбомолекулярные насосы широкого диапазона, такие как TURBOVAC55 производства LEYBOLD). В этом случае система откачки получается полностью безмасляной (сухой), что

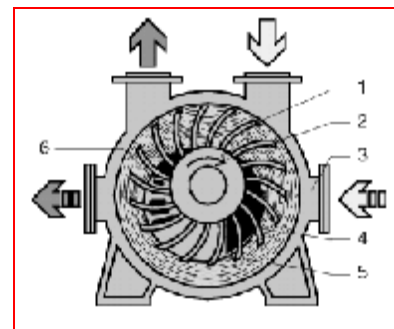
очень важно для проведения измерений в масс-спектро-метрических системах и течеискателях. По сравнению с пластинчато-роторными насосами эта комбинация насосов дает преимущество в том, что обычно гелий не растворяется в диафрагменном насосе, поэтому можно полностью исключить фоновый гелий.

## 2.1.2 Ротационные насосы с жидкостным уплотнением

### 2.1.2.1 Водокольцевые насосы

В силу принципа действия и простоты конструкции водокольцевые насосы лучше всего подходят для откачки газов и паров, которые могут содержать небольшое количество жидкости. Можно без проблем откачивать воздух, насыщенный парами воды, или другие газы, содержащие конденсируемые компоненты.

По конструкции водокольцевые насосы не чувствительны к любым загрязнениям, которые могут присутствовать в потоке газа. Достижимое входное давление находится в диапазоне от атмосферного давления до давления паров используемой жидкости. Для воды при  $15^\circ\text{C}$  можно получить рабочее давление 33 мбар. Типовым применением водокольцевых вакуумных насосов является напуск турбин в электростанциях. Водокольцевые вакуумные насосы (рис. 2.3.) являются ротационными насосами, которым нужна рабочая жидкость, которая вращается во время работы для откачки газа.



- |               |                             |
|---------------|-----------------------------|
| 1. ротор      | 4. входной канал            |
| 2. вал ротора | 5. кольцо жидкости          |
| 3. корпус     | 6. выпускной канал (гибкий) |

Рисунок 2.3. водокольцевой вакуумный насос (Siemens)

Рабочее колесо установлено со смещением (эксцентрично) в цилиндрическом корпусе. Когда насос не находится в работе, примерно половина насоса заполнена рабочей жидкостью. В осевом направлении ячейки, формируемые рабочим колесом, ограничиваются и уплотняются с помощью «дисков управления». Диски управления устанавливаются в щели всасывания и выброса на соответствующих портах насоса. При включении такого насоса рабочее колесо эксцентрично вращается внутри корпуса, создавая, таким об-

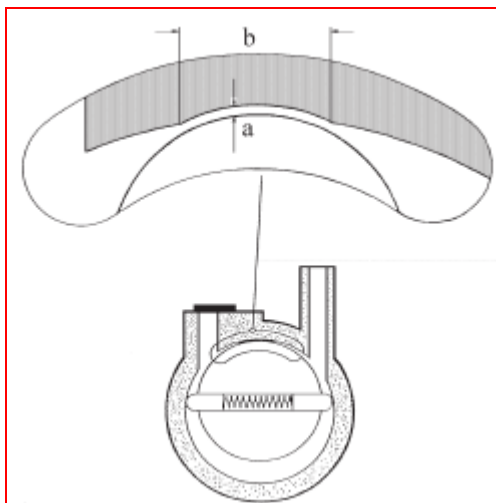
разом, концентрически вращающееся кольцо жидкости, которое в узкой точке полностью заполняет пространство между корпусом и рабочим колесом и отводится из камеры при продолжении вращения. Газ всасывается, т.к. камеры пусты и при последующем заполнении происходит сжатие. Ограничения для процессов всасывания и нагнетания устанавливаются за счет геометрии отверстий в дисках управления.

Помимо сжатия рабочие жидкости выполняют три главных задачи:

1. отводят тепло, образующееся при сжатии,
2. поглощают жидкости и конденсируемые пары,
3. обеспечивают уплотнение между рабочим колесом и корпусом.

### 2.1.2.2 Насосы с масляным уплотнением

Вакуумные насосы с перемещением являются обычными вакуумными насосами, в которых откачиваемый газ всасывается с помощью (плунжеров), роторов, пластин, клапанов и подобных компонентов, затем, возможно, сжимается и выпускается. Процесс откачки создается с помощью вращения ротора внутри насоса. Следует дифференцировать сухие компрессионные насосы и насосы с масляным уплотнением. С помощью уплотняющего масла можно получить на одной ступени высокие коэффициенты компрессии, до  $10^5$ . Без масла, «внутренние течи» значительно больше, а возможный коэффициент компрессии будет меньше 10.



постоянный минимальный зазор *a*  
для полного уплотнения прохода *b*

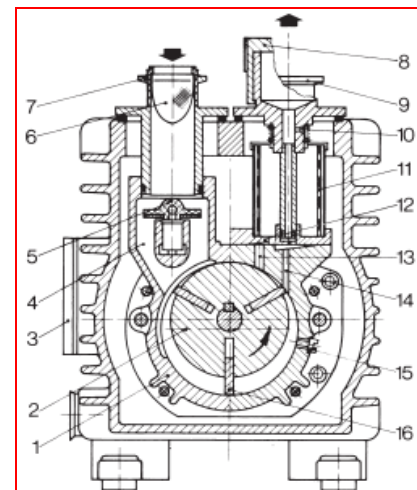
Рисунок 2.4. выравнивание уплотнения прохода в пластинчато-роторных насосах (двойное уплотнение)

Как показано в табл. 2.1, насосы с масляным уплотнением включают в себя пластинчато-роторные насосы и плунжерные (золотниковые) насосы с одной или двумя ступенями, а так же одноступенчатые плунжерные (трохоидные) насосы, которые сегодня представляют исторический интерес. Такие насосы всегда оборудованы

газобалластом, возможности которого впервые были описаны Геде в 1935 году (раздел 2.1.2.2.4). В указанных инженерных пределах газобалласт позволяет откачивать пары (в частности пары воды) без конденсации паров в насосе.

### 2.1.2.2.1 Пластинчато-роторные насосы (TRIVAC A, TRIVAC B, TRIVAC E, SO-GEVAC)

Пластинчато-роторные насосы (см. рис.2.5 и 2.6) состоят из цилиндрического корпуса (откачного кольца) 1 в котором со смещением подвешен ротор (2), вращающийся в направлении, указанном стрелкой. Ротор снабжен пластинами 16, которые прижимаются к стенкам с усилием, создаваемым пружиной, т.е. пластины скользят по внутренней поверхности корпуса. Газ, попадающий на вход 4, проталкивается пластиной и выталкивается из насоса с помощью выхлопного клапана с масляным уплотнением 12.

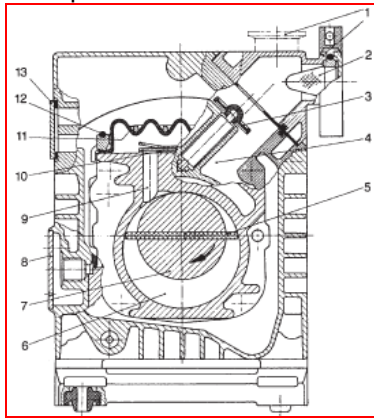


- |                                   |                        |
|-----------------------------------|------------------------|
| 1. корпус насоса                  | 9. выходной порт       |
| 2. ротор                          | 10. входной глушитель  |
| 3. смотровое окно с уровнем масла | 11. фильтр масла       |
| 4. отсосный короб                 | 12. выхлопной клапан   |
| 5. предохранительный клапан       | 13. вытяжной канал     |
| 6. пылеуловитель                  | 14. канал газобалласта |
| 7. входной порт                   | 15. впрыск масла       |
| 8. крышка газобалласта            | 16. пластина           |

Рисунок 2.5. поперечное сечение одноступенчатого пластинчато-роторного насоса TRIVAC A

В старых моделях насосов TRIVAC A производства LEYBOLD (рис.2.5) находится три пластины, расположенные радиально под углом  $120^\circ$ . Насосы TRIVAC B (рис.2.6) оборудованы двумя пластинами под углом  $180^\circ$ . В обоих случаях пластины прижимаются к стенке корпуса без использования пружин. При низких температурах окружающего воздуха эта особенность требует использования масла пониженной вязкости. Насосы серии А смазываются при повышении перепада давления, в то время как насосы серии В оборудованы шестеренным масляным насосом для обеспечения давления смазки. Насосы TRI-

VAC серии В оборудованы высоко надежным предохранительным клапаном и горизонтальным или вертикальным выравниванием для входного и выходного портов.



- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| 1. входной порт             | 8. соединение для подачи инертного газа для газобалласта |
| 2. пылеуловитель ротор      | 9. вытяжной канал  |
| 3. предохранительный клапан | 10. выхлопной клапан                                     |
| 4. отсосный короб           | 11. туманоуловитель                                      |
| 5. пластина                 | 12. пружина  |
| 6. рабочая камера           | 13. соединение для масляного фильтра                     |
| 7. ротор                    |  |

Рисунок 2.6. поперечное сечение одноступенчатого пластинчато-роторного насоса TRIVAC B

Смотровые окна с указателем уровня масла и газобалласт расположены на одной стороне масляной коробки (для удобства пользователя). В комбинации с системой TRIVAC BCS насос может использоваться с широким диапазоном принадлежностей, разработанных в основном для

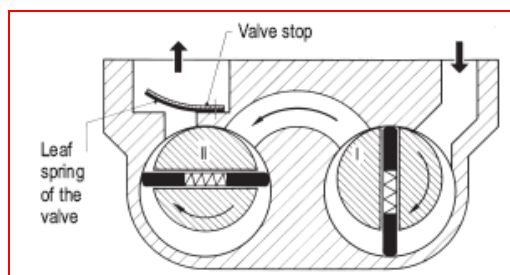
полупроводниковой промышленности. Масляный резервуар пластинчато-роторного насоса и другие масла, уплотняющие насос служат для смазки и уплотнения насоса, а так же заполняют вредное пространство в щелях. Масло отводит тепло, создаваемое при сжатии газа, т.е. охлаждает насос. Масло обеспечивает уплотнение между ротором и кольцом насоса. Эти компоненты находятся почти в постоянном контакте по прямой (линии на цилиндре корпуса). Чтобы повысить уплотняющую поверхность масла и в откачивающее кольцо встраивается так называемое уплотнение прохода (рис.2.4). Оно обеспечивает лучшее уплотнение и дает высокий коэффициент компрессии или низкое предельное давление. Компания LEYBOLD выпускает три различных диапазона пластинчато-роторных насосов, специально адаптированных для различных областей применения, где используется высокое входное давление, необходимо низкое предельное давление или технологических процессов в полупроводниковой промышленности. Основные характеристики этих насосов приведены в табл. 2.2. Пластинчато-роторные насосы TRIVAC выпускаются одноступенчатые (TRIVAC S) и двухступенчатые (TRIVAC D) (см. рис.2.7). Двухступенчатые насосы с масляным уплотнением позволяют получить более низкое рабочее и предельное давления чем одноступенчатые. Причиной этого является тот факт, что в одноступенчатых насосах масло находится в нежелательном контакте с атмосферой, из которой газы могут попадать в вакуум, ухудшая предельное давление. В двухступенчатых насосах производства LEYBOLD, масло, которое прошло

	TRIVAC A	TRIVAC B	TRIVAC BCS	TRIVAC E	SOGEVAC
Количество пластин на ступени	3	2	2	2	3 (тангенциальные)
Быстрота действия [м <sup>3</sup> /ч]	1 – 1.5	1.6	–	–	16 – 25
	2 – 4	4 – 8	16 – 25	2.5	40 – 100
	8 – 16	16 – 25	40 – 65	–	180 – 280
	30 – 60	40 – 65	–	–	585 – 1200
Уплотнение прохода	Да	Да	Да	Да	Нет
Предельное давление, одна ступень [мбар]	$< 2 \cdot 10^{-2}$	$< 2 \cdot 10^{-2}$	$< 2 \cdot 10^{-2}$	–	$< 5 \cdot 10^{-1}$
Предельное давление, две ступени [мбар]	$< 2.5 \cdot 10^{-4}$	$< 1 \cdot 10^{-4}$	$< 1 \cdot 10^{-4}$	$< 1 \cdot 10^{-4}$	–
Подача масла	Перепад давления	Шестеренный насос	Шестеренный насос	Эксцентриковый насос	Перепад давления
Щели	Для всех типов : около 0.01 .. 0.05 мм				
Подшипники/смазка	Упорные / масло	Упорные / масло	Упорные / масло	Шариковые / смазка	Шариковые / масло
Особые характеристики	–	Гидропневматический предохранительный клапан	На компоненты, контактирующие с откачиваемой средой, нанесено покрытие	Широкий диапазон принадлежности	Низкие затраты
Откачиваемая среда	без аммиака	Чистая/легкие частицы	Агрессивные/коррозионные	Чистая/легкие частицы	Чистая
Назначение	Многоцелевые насосы	Многоцелевые насосы	Полупроводниковая промышленность	Многоцелевые насосы	Упаковочное производство

Таблица 2.2. Диапазон пластинчато-роторных насосов



дегазацию, подается на ступень со стороны вакуума (1-ая ступень на рис. 2.7): предельное давление лежит почти в области высокого вакуума, а самое низкое рабочее давление – в области среднего/высокого вакуума.



справа -высоковакуумная ступень  
слева- форвакуумная ступень

Рисунок 2.7. поперечное сечение двухступенчатого пластинчато-роторного насоса

Замечание: работа высоковакуумной (первой) ступени с небольшим количеством масла или без масла – несмотря на низкое предельное давление – создает на практике значительные трудности и будет значительно ухудшать работу насоса.

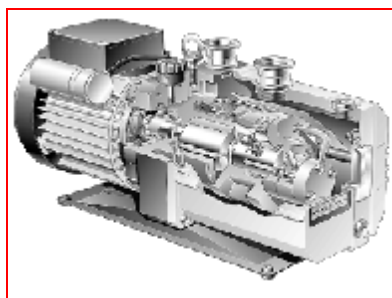


Рисунок 2.8а. Двухступенчатый пластинчато-роторный насос (TRIVAC E)

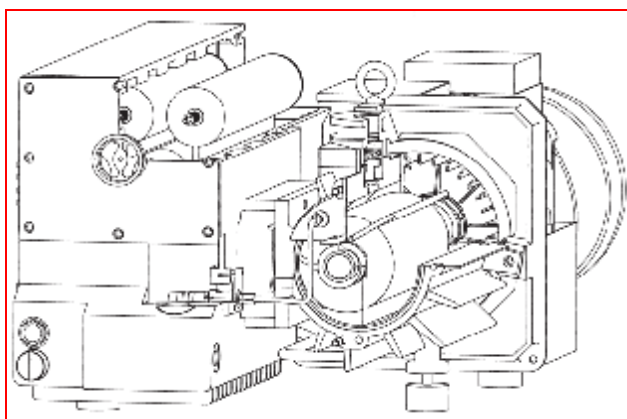
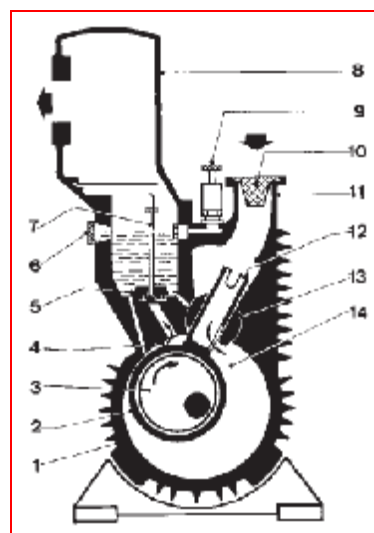


Рисунок 2.8б. Насос SOGEVAC SV300 с тремя тангенциальными пластинами

### 2.1.2.2.2 Золотниковые насосы (Е-насосы)

На рис. 2.9 показано сечение плунжерного насоса с одной ступенью. Здесь поршень 2, который движется поступательно за счет вращения эксцентрика 3 по стенке камеры. Газ, который попадает в насос через входной порт 11 проходит через канал всасывания золотникового клапана 12 в рабочую камеру 14. Золотниковый клапан образует блок с поршнем и скользит туда-сюда между вращающимся регулирующим клапаном в корпусе (шарнир 13). Втекающий в насос газ попадает в рабочую (компрессионную) камеру 4. При повороте поршень сжимает газ, пока он не выйдет через клапан с масляным уплотнением 5. Как и в пластинчато-роторных насосах, масляный резервуар используется для смазки, уплотнения, заполнения вредного пространства и охлаждения. Т.к. камера делится поршнем на два отделения, каждый поворот завершает рабочий цикл (см. рис. 2.10). Золотниковые насосы выпускаются одно и двухступенчатыми. Для большинства вакуумных процессов комбинация насоса Рутса с одноступенчатым золотниковым насосом может быть более предпочтительна, чем использование одного двухступенчатого золотникового насоса. Если такая комбинация или двухступенчатый насос могут работать неадекватно, рекомендуется использовать насос Рутса с двухступенчатым насосом. Не допустимо использование комбинации пластинчато-роторных насосов и насосов Рутса.

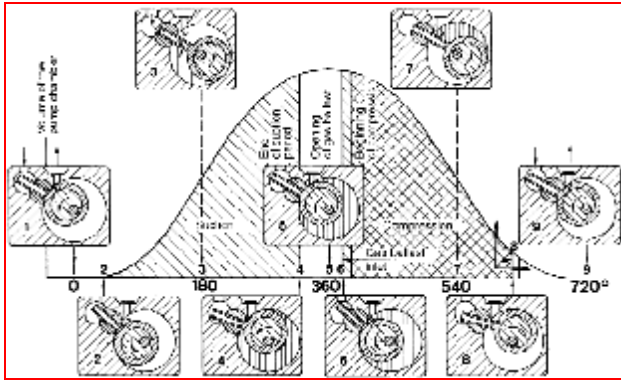


- |   |  |
|---|--|
| 1. корпус                                 | 7. канал газобалласта                          |
| 2. цилиндрический поршень                 | 8. выхлопной порт                              |
| 3. эксцентрик                             | 9. клапан газобалласта                         |
| 4. рабочая камера                         | 10. туманоуловитель                            |
| 5. клапан давления с масляным уплотнением | 11. входной порт                               |
| 6. смотровое окно с уровнем масла         | 12. золотниковый клапан                        |
|   | 13. шарнир                                     |
|   | 14. откачивающая камера (в нее втекает воздух) |

Рисунок 2.9. Поперечное сечение одноступенчатого золотникового насоса (моноблочная конструкция)

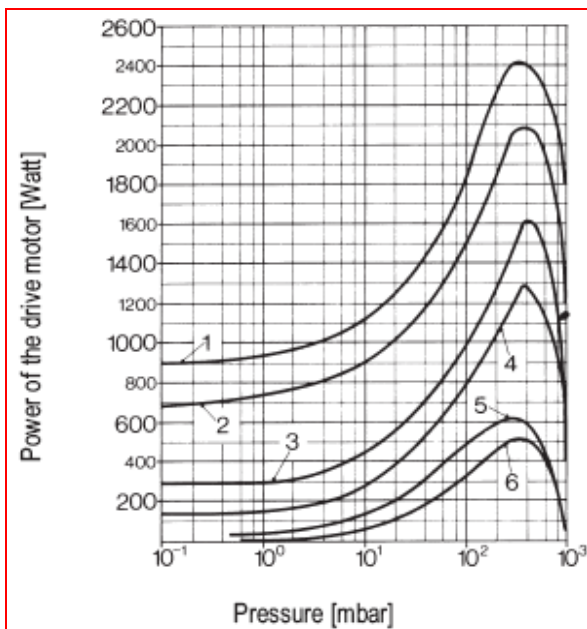
Мощность двигателя

Двигатели, входящие в комплект поставки пластинчато-роторного или золотникового насосов обеспечивают достаточную мощность при температуре окружающей среды 12°C, а при использовании наших специальных масел обеспечивают максимальную требуемую мощность (при 400 мбар). Внутри действующего рабочего диапазона насоса системе привода прогретого насоса необходима только треть мощности установленного насоса (см. рис. 2.11).



1. верхнее вредное пространство
2. щель в канале всасывания открывается – начало периода всасывания
- 3- нижнее вредное пространство – щель полностью открыта, откачиваемый газ (указан стрелкой) полностью заполняет
4. щель закрывается – окончание периода всасывания
5. верхняя мертвая точка- максимальное расстояние между поршнем и статором
6. перед началом периода сжатия поршень открывает газобалласт
7. газобалласт полностью открыт
8. закрытие газобалласта
9. конец цикла откачки

Рисунок 2.10. Рабочий цикл золотникового насоса



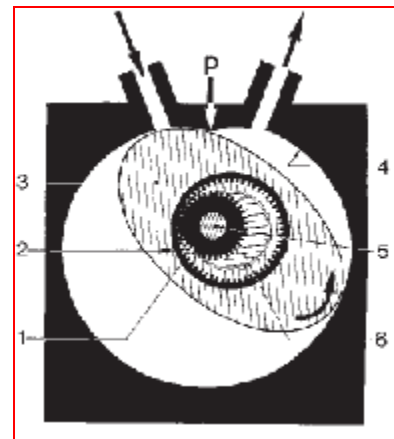
1. кривая при температуре 32°C
2. кривая при температуре 40°C
3. кривая при температуре 60°C
4. кривая при температуре 90°C
5. теоретическая кривая адиабатического сжатия
6. теоретическая кривая изотермического сжатия

Рисунок 2.11. Зависимость мощности двигателя золотникового насоса (быстрота действия 60 м<sup>3</sup>/ч) от входного давления и рабочей температуры. Кривые насосов

с газобалластом аналогичны представленным.

### 2.1.2.2.3 Трохоидный (поршневой) насос

Эти насосы принадлежат к классу так называемых насосов с вращающимся поршнем (см. табл. 2.1) в группе ротационных насосов. В таком насосе центр массы поршня описывает окружность вокруг оси вращения. Эти насосы могут по сравнению с плунжерными насосами быть полностью динамически сбалансированными. Это дает преимущество в том, что большие насосы могут работать без вибрации, и поэтому их можно будет устанавливать без фундамента. Более того, такие насосы могут работать с более высокой скоростью по сравнению с плунжерными насосами (см. ниже). Объем откачиваемой камеры по сравнению со объемом входа насоса, так называемый удельный объем, для трохойдных насосов примерно в двое больше объема плунжерных насосов. Большие плунжерные насосы работают со скоростью примерно 500 об/мин. Трохоидные насосы могут работать со скоростью 1000 об/мин, что применимо и для насосов больших конструкций. Они почти в 4 раза меньше по сравнению с плунжерными насосами, имеющими такую же быстроту действия, и работают без создания вибрации. К сожалению, эти достоинства сопряжены с большими трудностями при их производстве, поэтому сегодня LEYBOLD больше не производит трохойдные насосы. Принцип работы таких насосов показан на рис. 2.12.



1. зубчатое колесо на ведущем валу
2. зубчатое колесо поршня
3. эллиптический поршень
4. внутренняя поверхность насоса
5. ведущий вал
6. эксцентрик

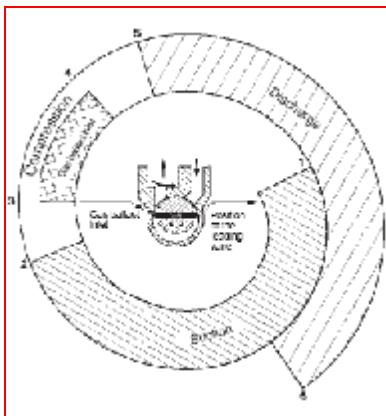
Рисунок 2.12. поперечное сечение трохойдного насоса

### 2.1.2.2.4 Газобалласт

Функция газобалласта используется в пластинчато-роторных, плунжерных, трохойдных насосах для откачки не только газов, но и конденсируемых паров.



Газобалласт (рис. 2.13) предотвращает конденсацию паров в рабочей камере насоса. При откачке пары могут только сжиматься до давления их насыщенного пара при рабочей температуре насоса. Например, если откачиваются пары воды, то при температуре насоса 70°C они могут сжиматься до давления 312 мбар (давление насыщенного водяного пара при 70°C – табл. 13, раздел 9). При дальнейшем сжатии пары воды сконденсируются без повышения давления. В насосе не создается избыточное давление, а выхлопной клапан не откроется. Вместо паров воды получится вода, которая останется в насосе и смещается с маслом насоса. Это может очень быстро ухудшить смазывающие свойства масла, и насос может заклинить, если в масле будет содержаться много воды. Газобалласт, разработанный в 1935 г. Геде, предотвращает случайную конденсацию пара в насосе следующим образом. Перед началом цикла компрессии (см. рис. 2.13) точно определенное количество воздуха (балластного газа) напускается в камеру насоса. Количество газа такое, чтобы понизить коэффициент компрессии максимум до 10:1. Теперь пары, которые попали в насос, могут сжиматься вместе с газобалластом, до достижения точки конденсации и выхода из насоса. Парциальное давление паров, которые попадают в насос, не может превышать некоторого значения. Оно должно быть ниже, иначе при коэффициенте компрессии 10, пары не смогут конденсироваться при рабочей температуре насоса. При откачке паров воды это критическое значение называется «допустимость паров воды».



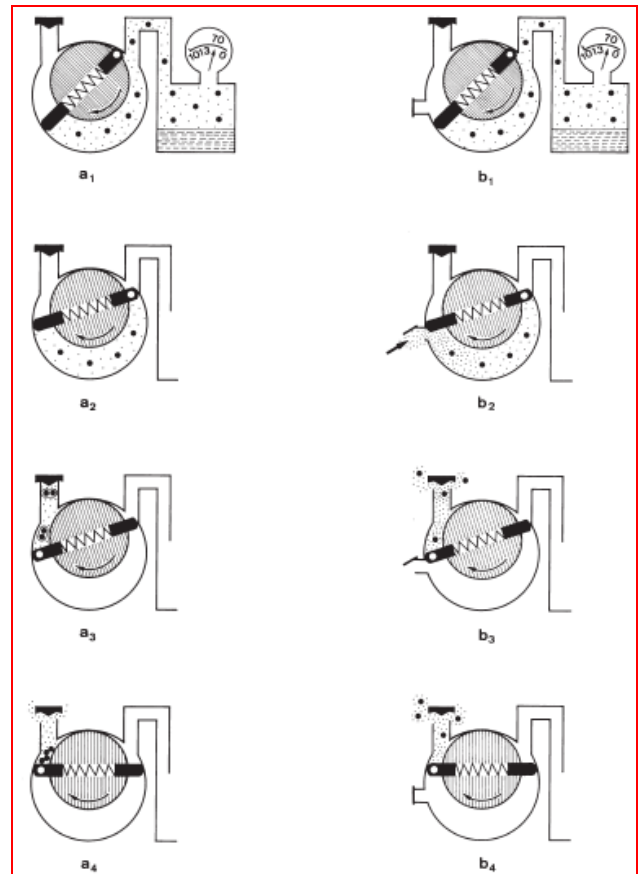
- 1-2 всасывание  
2-5 сжатие  
3-4 подача газобалласта  
5-6 выброс

Рисунок 2.13. Рабочий цикл пластинчато-роторного насоса с газобалластом

На рис.2.14 схематически показан процесс откачки с газобалластом и без в пластинчато-роторном насосе при откачке конденсируемых паров.

При откачке паров должны соблюдаться два требования:

- 1) насос должен быть прогрет до рабочей температуры,
- 2) клапан газобалласта должен быть открыт. (При открытом клапане газобалласта рабочая температура насоса повышается примерно на 10°C. Перед откачкой паров насос должен поработать с открытым клапаном газобалласта примерно 30 минут.)



#### Без газобалласта

1. насос подсоединен к вакуумной камере, которая уже откачана (до 70 мбар) – теперь должна пойти откачка паров воды.
2. камера насоса отсоединена от вакуумной камеры – начинается сжатие
3. содержимое камеры насоса сжато настолько, что из пара образуются капельки, превышения давления еще нет.
4. остаточный газ только сейчас создал избыточное давление и открыл нагнетательный клапан, но пар уже сконденсировался и капельки остались в насосе.

#### С газобалластом

1. насос подсоединен к вакуумной камере, которая уже откачана (до 70 мбар) – теперь должна пойти откачка паров воды.
2. камера насоса отсоединена от вакуумной камеры – клапан газобалласта, через который подается дополнительный воздух из окружающей среды, открывается. Этот дополнительный воздух называется газобалласт.
3. нагнетательный клапан открывается и частички пара и газа покидают насос. Давление, требуемое для открытия клапана, было достигнуто ранее при попадании газобалласта, поэтому процесс конденсации произойти не может.
4. насос выпускает оставшийся воздух и пар

Рисунок 2.14. процесс откачки с и без газобалластом в пластинчато-роторном насосе при откачке конденсируемых паров

#### Совместная откачка газов и паров



При одновременной откачке газов и конденсируемых паров из вакуумной системы, количество остаточного газа будет достаточным для предотвращения конденсации паров внутри насоса. Количество пара, которое можно откачать без конденсации его в насосе можно рассчитать следующим образом:

$$\frac{P_{vapour}}{P_{vapour} + P_{perm}} < \frac{P_{vapour, sat}}{P_{sum}} \quad (2.1)$$

где

$P_{vapour}$  – парциальное давление пара на входе в насос,

$P_{perm}$  – общее давление всех газов на входе в насос,

$P_{vapour, sat}$  – давление насыщения для откачиваемого пара в зависимости от температуры (см. рис.2.15),

$$P_{sum} = P_{exhaust} + \Delta p_{valve} + \Delta p_{exhaust filter}$$

$\Delta p_{valve}$  – перепад давления на выхлопном клапане, зависящий от типа насоса и рабочих условий 0,2...0,4 бар,

$\Delta p_{exhaust filter}$  - перепад давления на выхлопном фильтре 0...0,5 бар.

### Пример 1:

С помощью пластинчато-роторного насоса с последовательно подключенным внешним фильтром масляного тумана откачивается смесь паров воды и воздуха. В уравнение 2.1 подставляются следующие значения:

$$p_{exhaust} = 1 \text{ бар},$$

$\Delta p_{valve} + \Delta p_{exhaust filter} = 0.35 \text{ бар}$  при температуре насоса 70°C,

$$p_{sum} = 1.35 \text{ бар}, \quad p_{vapour sat} (H_2O) = 312 \text{ мбар}$$

(табл. 13, раздел 9).

Использование уравнения 2.1 дает

$$\frac{P_{vapour, H_2O}}{P_{vapour, H_2O} + P_{air}} < \frac{312}{1350} = 0.23$$

Т.е. давление паров воды в смеси с воздухом не должно превышать 23% от общего давления смеси.

### Пример 2:

Уксусная кислота откачивается с помощью плунжерного насоса.

$p_{exhaust} = 1.1 \text{ бар}$ , с учетом сопротивления потока в турбопроводах,

$$\Delta p_{valve} = 0.25 \text{ бар},$$

$\Delta p_{exhaust filter} = 0.15 \text{ бар}$  (потери давления в фильтре масляного тумана).

Следовательно  $p_{sum} = 1.5 \text{ бар}$ .

При охлаждении насоса и масла температура составляет 100°C. давление насыщенного пара

$P_{vapour, sat} = 500 \text{ мбар}$  (см. рис. 2.15).

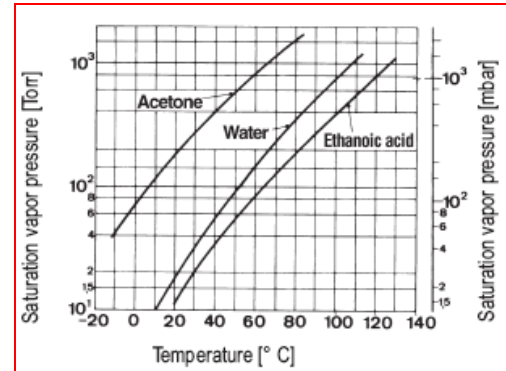


Рисунок 2.15. Давление насыщенного пара

Использование уравнения 2.1 дает

$$\frac{P_{vapour, acid}}{P_{vapour, acid} + P_{air}} < \frac{0.5}{1.5} = \frac{1}{3}$$

Возвращаясь к вопросу откачки паров воды в смеси с воздухом, соотношение 3 частей газа и 1 части паров, приведенное в примере 1, может использоваться только как рекомендация. На практике рекомендуется всегда запускать насосы описанных здесь типов с открытым клапаном газобалласта, т.к. процесс нагрева насоса до рабочей температуры занимает определенное время. Из уравнения 2.1 следует отношение для допустимого парциального давления откачиваемых паров  $P_{vapour}$

$$P_{vapour} \leq \frac{P_{vapour, sat}}{P_{sum} - P_{vapour, sat}} \cdot P_{perm} \quad (2.2)$$

Это соотношение показывает, что при  $p_{perm}=0$ , пары не могут откачиваться без конденсации в насосе, пока не подается газобалласт. Соответствующая формула:

$$P_{vapour} \leq \frac{B}{S} P_{sum} \cdot \frac{(P_{vapour, sat} - P_{vapour, g.b.})}{P_{sum} - P_{vapour, sat}} + \frac{P_{vapour sat}}{P_{sum} - P_{vapour sat}} P_{perm} \quad (2.3)$$

где



$B$  – объем воздуха при 1013 мбар, который попадает в камеру насоса за единицу времени, называемый газобалласт,

$S$  – номинальная быстрота действия насоса (объемный поток),

$P_{sum}$  – давление на выходе насоса (максимальное значение 1330 мбар),

$P_{vapour, sat}$  – давление насыщенного пара на выходном порту насоса,

$P_{vapour, g.b.}$  – парциальное давление любого пара, который может присутствовать в газе, используемом в качестве газобалласта (пары воды в атмосферном воздухе, используемом в качестве газобалласта),

$P_{perm}$  – давление всех газов на входном порту насоса.

Уравнение 2.3 показывает, что при использовании газобалласта ( $B \neq 0$ ), пары можно откачивать без конденсации, если на входе в насос нет газов. В качестве газобалласта может использоваться смесь неконденсируемых газов и конденсируемых паров до тех пор, пока давление этого пара будет меньше давления насыщенного пара, который откачивается при рабочей температуре насоса.

#### Допустимость паров воды

Важным моментом относительно допустимости паров является откачка паров воды. По стандарту PNEUROP допустимость паров воды определяется так:

«Допустимость паров воды – это наибольшее давление, при котором вакуумный насос в условиях действия номинальных температуры окружающей среды и атмосферного давления (20°C, 1013 мбар) может непрерывно откачивать чистые пары воды. Измеряется в мбар» Обозначается

$P_{W,O}$ .

Использование выражения (2.3) в этом случае:

$$P_{perm} = 0, \quad P_{vapour, sat} = p_s(H_2O),$$

$$P_{W,O} = \frac{B}{S} P_{sum} \cdot \frac{p_s(H_2O) - P_{vapour, g.b.}}{P_{sum} - p_s(H_2O)} \quad (2.4)$$

Если в качестве газобалласта используется атмосферный воздух влажностью 50%, то

$P_{vapour, g.b.} = 13 \text{ мбар}$ , при  $B = 0.10$ , то

$P_{sum} = 1330 \text{ мбар}$ . Допустимость паров воды

$P_{W,O}$  как функция от температуры насоса представлена в виде нижней кривой на рис. 2.16. Другие кривые соответствуют откачке смеси паров воды и воздуха при  $P_{perm} = P_{air} \neq 0$ , где  $P_L$  – давление в мбар. В этих случаях как показано на

рис.2.16 пары воды могут откачиваться при большем парциальном давлении  $p_W$ . Диаграммы для  $P_{W,O}$ , приведенные в каталоге, означают нижнюю границу безопасной области.

Согласно уравнению 2.4 повышение газобалласта  $B$  будет приводить к увеличению допустимости паров воды  $P_{W,O}$ . На практике увеличение газобалласта  $B$ , особенно в одноступенчатых насосах с газобалластом, затруднено по той причине, что предельное давление насоса, работающего с открытым клапаном газобалласта, ухудшается при увеличении газобалласта  $B$ . Подобные рассуждения применимы к общему выражению 2.3. для допустимого парциального давления паров воды  $P_{vapour}$ .

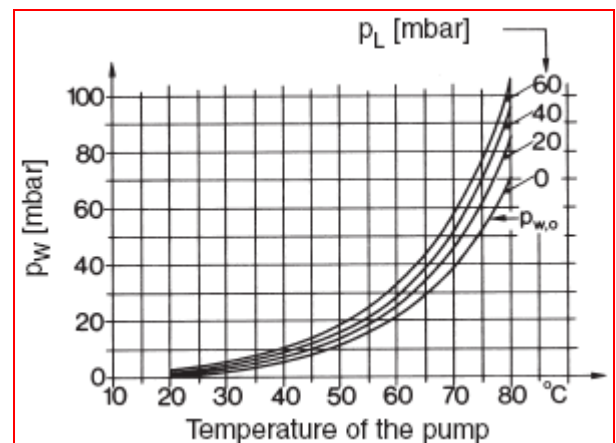


Рисунок 2.16. парциальное давление  $p_W$  паров воды, которые могут быть откачаны при открытом газобалласте без конденсации в насосе как функция от рабочей температуры насоса для различных парциальных давлений воздуха  $p_L$ . Допустимость паров воды  $P_{W,O}$  является нижней кривой.

В начале процесса откачки насос с газобалластом следует включать с открытым клапаном газобалласта. В большинстве случаев на стенках вакуумной камеры присутствует тонкий слой воды, который будет потихоньку испаряться. Чтобы получить наименьшее предельное давление, газобалласт следует закрыть после того, как пары будут откачаны. Для насосов производства LEYBOLD допустимость паров воды обычно лежит между 33 и 66 мбар. Двухступенчатые могут иметь другие уровни допустимости паров воды в соответствии с коэффициентом компрессии между ступенями (они имеют рабочие камеры различных размеров).

#### Другие газы в качестве газобалласта

В качестве газобалласта обычно используется воздух. В особых случаях, например при откачке взрывоопасных или токсичных газов, могут ис-

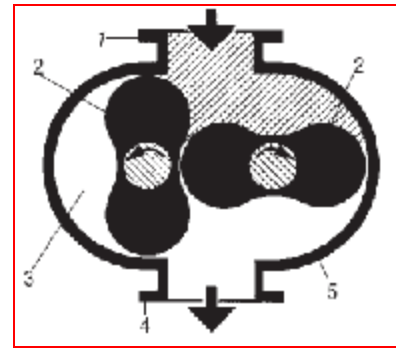
пользоваться инертными газами или азотом (см. раздел 8.3.1.3).

## 2.1.3 Ротационные насосы с сухим сжатием

### 2.1.3.1 Насосы Рутса

Принцип конструкции насосов Рутса был изобретен в 1848 г. И. Девисом (Davies), за 20 лет до того, как был применен на практике Americans Francis и Philander Roots. В начале такие насосы использовались как воздуходувки для двигателей сгорания. Позже, изменив в обратную сторону привод, принцип работы был задействован в газомерах (счетчиках). В вакуумной инженерии этот принцип действия стал использоваться только с 1954 г. Насосы Рутса используются в комбинации с форвакуумными насосами (пластинчато-роторными, плунжерными насосами), что увеличивает диапазон их применения до области среднего вакуума. Двухступенчатые насосы Рутса могут работать и в высоковакуумной области. Принцип работы насоса Рутса позволяет работать с очень большой быстротой действия (до 100,000 м<sup>3</sup>/ч), что более экономично по сравнению с пароструйными (пароэжекторными) насосами, работающими в этом же диапазоне.

Насосы Рутса (см. рис. 2.17) являются ротационными насосами с положительным перемещением, когда два симметрично расположенных ротора вращаются внутри корпуса насоса в противоположные стороны. Два ротора имеют лемнискатный профиль (в форме восьмерки) и синхронизированы с помощью зубчатой передачи. Зазор между роторами и стенками корпуса и роторами составляет только несколько десятых миллиметра. По этой причине насосы Рутса могут работать при высоких скоростях без механического износа. По сравнению с пластинчато-роторными и плунжерными насосами насосы Рутса не имеют масляного уплотнения, поэтому внутренние течи сухих компрессионных насосов приводят к тому, что можно получить коэффициент компрессии только в диапазоне 10...100. Внутренние течи насосов Рутса и других сухих компрессионных насосов связаны с их принципом. Во время фазы сжатия между поверхностями роторов и корпуса имеется слой газа, который высвобождается во время всасывания. Толщина слоя мигрирующего газа зависит от величины зазора между роторами и стенками корпуса. Из-за относительно сложных тепловых условий в насосе Рутса, невозможно считать все в холодном состоянии. Небольшие зазоры и низкий обратный поток возможны при рабочем давлении порядка 1 мбар. Возможно получить большой коэффициент компрессии в этом диапазоне, но этот диапазон является критическим с точки зрения контакта между роторами и стенками.



1. входной фланец
2. роторы
3. камера
4. выхлопной фланец
5. корпус

Рисунок 2.17. поперечное сечение насоса Рутса

#### Характеристики насоса Рутса

Количество газа  $Q_{eff}$ , эффективно откачиваемое с помощью насоса Рутса вычисляется из теоретически откачиваемого количества газа  $Q_{th}$  и внутренних течей  $Q_{iR}$  (количество газа, которое теряется) следующим образом:

$$Q_{eff} = Q_{th} - Q_{iR} \quad (2.5)$$

Теоретически откачиваемый поток газ определяется как

$$Q_{th} = p_a \cdot S_{th} \quad (2.6)$$

где

$p_a$  – входное давление,

$S_{th}$  – теоретическая быстрота действия, которая может быть представлена как произведение рабочего объема  $V_s$  на скорость  $n$ :

$$S_{th} = n \cdot V_s \quad (2.7)$$

Обычно внутренние течи рассчитываются как

$$Q_{iR} = p_v \cdot S_{iR} \quad (2.8)$$

где  $p_v$  – выпускное давление (давление с форвакуумной стороны), а  $S_{iR}$  – быстрота действия обратного потока с

$$S_{iR} = n \cdot V_{iR} \quad (2.9)$$

т.е. произведение скорости и объема внутренних течей  $V_{iR}$ .

Объемная эффективность (КПД) насосов Рутса описывается как

$$\eta = \frac{Q_{eff}}{Q_{th}} \quad (2.10)$$

При использовании выражений 2.5...2.8 получим

$$\eta = 1 - \frac{p_V}{p_a} \cdot \frac{S_{iR}}{S_{th}} \quad (2.11)$$

Обозначив соотношение  $p_V/p_a$  за  $k$  получим

$$\eta = 1 - k \frac{S_{iR}}{S_{th}} \quad (2.11a)$$

Максимальное сжатие достигается при нулевой производительности (см. PNEUROP и DIN 28 426, часть 2). Она обозначается как  $k_0$

$$k_0 = \left( \frac{S_{th}}{S_{iR}} \right)_\eta = 0 \quad (2.12)$$

$k_0$  является характеристикой насоса Рутса, которая обычно указывается как функция от выпускного давления  $p_V$  (см. рис.2.18). Так же  $k_0$  зависит от рода газа (не сильно).

Для определения КПД насоса Рутса обычно используется выражение

$$\eta = 1 - \frac{k}{k_0} \quad (2.13)$$

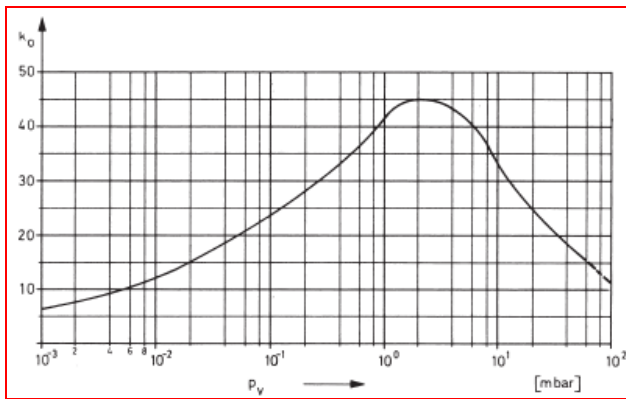


Рисунок 2.18. Зависимость максимального сжатия  $k_0$  насоса Рутса RUVAC WA2001

от выпускного давления  $p_V$ .

Обычно насосы Руста работают с установленными за ними форвакуумными насосами, имеющими номинальную быстроту действия  $S_V$ . Уравнение дает

$$S_V \cdot p_V = S_{eff} \cdot p_a = \eta \cdot S_{th} \cdot p_a \quad (2.14)$$

Из этого получаем

$$k = \frac{p_V}{p_a} = \eta \cdot \frac{S_{th}}{S_V} \quad (2.15)$$

Соотношение  $S_{th}/S_V$  (теоретической быстроты действия насоса Рутса к скорости действия форвакуумного насоса) обозначается  $k_{th}$ . Из 2.15 получаем

$$k = \eta \cdot k_{th} \quad (2.16)$$

Выражение 2.16 указывает, что сжатие  $k$  в насосах Рутса должно быть всегда меньше отношения  $k_{th}$  между насосом Рутса и форвакуумным насосом т.к. КПД всегда меньше 1.

Комбинируя выражения 2.13 и 2.16 получаем хорошо известное выражение для КПД

$$\eta = \frac{k_0}{k_0 + k_{th}} \quad (2.17)$$

Значения, полученные из выражения 2.17 используются только для комбинации насоса Рутса с форвакуумным насосом, с максимальным сжатием  $k_0$  и отношением  $k_{th}$  между насосом Рутса и форвакуумным насосом.

С помощью представленных выше уравнений можно рассчитать быстроту откачки для комбинации насоса Рутса и форвакуумного насоса. Для этого необходимо знать:

- теоретическую быстроту действия насоса Рутса  $S_{th}$ ,
- максимальное сжатие как функцию от выпускного (форвакуумного) давления  $k_0(p_V)$ ,
- быстроту действия форвакуумного насоса  $S_V(p_V)$ .

В табл. 2.3. представлены результаты расчетов для комбинации насоса Рутса **RUVAC WA2001/E250** (плунжерного насоса, работающего без газобалласта). В расчетах используется следующее значение  $S_{th}$ :

$$S_{th} = 2050 - 2.5\% = 2000 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Выпускное давление (форвакуум) $p_V$	Быстрота действия $S_V$ насоса E 250	$k_{th} = S_{th}/S_V = 2001/S_V$	$k_0(p_V)$ насоса RUVAC WA 2001	$\eta = \frac{k_0}{k_0 + k_{th}}$ (КПД)	$S_{eff} = \eta \cdot S_{th}$ (ур.2.14)	Входное давление $p_a = p_V \cdot S_V/S_{eff}$
100	250	8.0	12.5	0.61	1.220	21
40	250	8.0	18	0.69	1.380	7.2
10	250	8.0	33	0.8	1.600	1.6
5	250	8.0	42	0.84	1.680	0.75
1	250	8.0	41	0.84	1.680	0.15
$5 \cdot 10^{-1}$	220	9.1	35	0.79	1.580	$7 \cdot 10^{-2}$
$1 \cdot 10^{-1}$	120	16.6	23	0.6	1.200	$1 \cdot 10^{-2}$
$4 \cdot 10^{-2}$	30	67	18	0.21	420	$3 \cdot 10^{-3}$

Значения, взятые из правых столбцов, дают точное значение быстроты действия для комбинации WA 2001/E250 (рис.2.19, верхняя кривая)

Характеристики быстроты действия для комбинации WA 2001/E250

Таблица 2.3

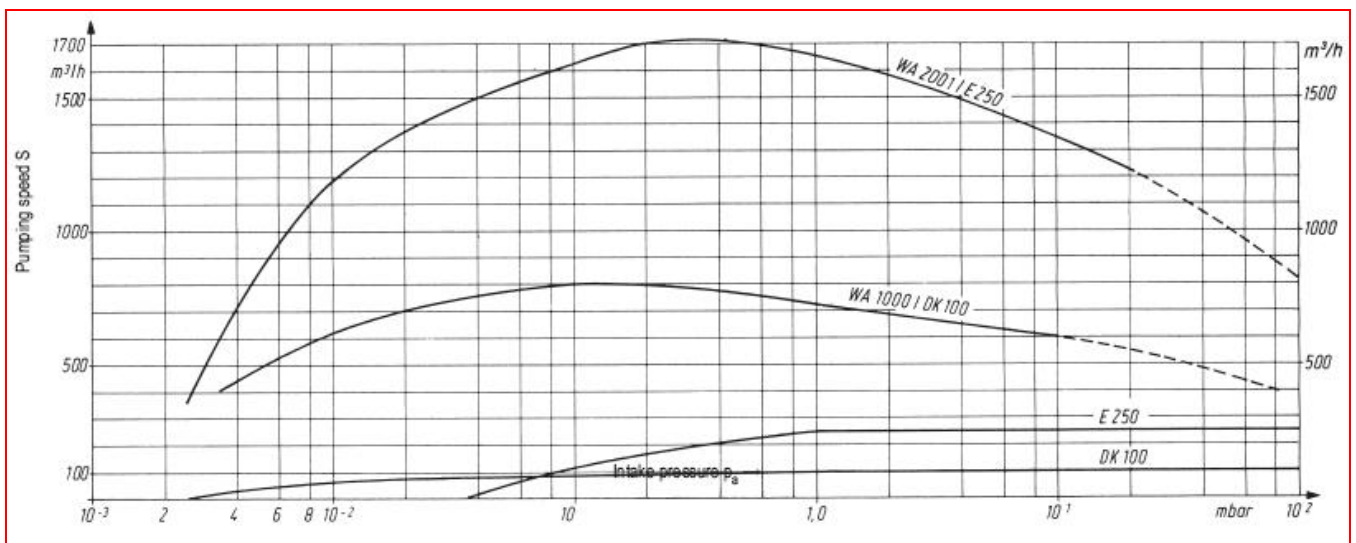


Рисунок 2.19. Кривые быстроты действия для различных комбинаций насосов с соответствующими форвакуумными насосами

Описанный выше метод можно применять для систем откачки, состоящих из ротационного форвакуумного насоса и нескольких насосов Рутса, соединенных последовательно. Сначала определяются параметры откачки форвакуумного насоса и первого насоса Рутса, затем эта комбинация полагается на форвакуумный насос для второго насоса Рутса и так далее. При этом необходимо знать теоретические быстроты действия всех насосов в системе и сжатие  $k_0$  как функцию выпускного давления. Как было указано, оно зависит от вакуумного процесса, для которого отношение подходит больше всего. Желательно, чтобы форвакуумный насос и насос Рутса оба имели одинаковую быстроту действия в области низкого вакуума (форвакуума).

#### Мощность, необходимая для насоса Рутса

Сжатие в насосе Рутса происходит за счет внешней компрессии и является изохорическим сжатием. Эксперименты показывают, что соблюдается следующее уравнение

$$N_{compression} = S_{th} (p_V - p_a) \quad (2.18)$$

Чтобы определить общую мощность (мощность на валу) насоса, необходимо учитывать механические потери мощности  $N_V$  (например в подшипниках):

$$N_{tot} = N_{compression} + \sum N_V \quad (2.19)$$

Суммарные потери мощности  $N_V$  – как показывают эксперименты – примерно пропорциональны  $S_{th}$ :

$$\sum N_V = const \cdot S_{th} \quad (2.20)$$

В зависимости от типа насоса и его конструкции значение этой постоянной находится в диапазоне 0,5...2 Вт ч/м<sup>3</sup>.

Тогда общая мощность будет:



$$N_{tot} = S_{th}(p_v - p_a + const)$$

Соответствующие числовые значения, которые используются при расчете:

$$N_{tot} = S_{th}(p_v - p_a + const) \cdot 3 \cdot 10^{-2} \text{ Bm} \quad (2.21)$$

где  $p_v, p_a$  измеряются в мбар,  $S_{th}$  – м<sup>3</sup>/ч, постоянная  $const$  находится в диапазоне 18...72 мбар.

### Нагрузка насосов Рутса

Количество мощности, поступающей в насос, определяет его температуру. Если температура повысится выше значения, определенного максимальным допустимым перепадом давления  $p_v - p_a$ , то это может быть опасным, т.к. приведет к заклиниванию роторов в корпусе в следствие их теплового расширения. На максимальный допустимый перепад давления  $\Delta p_{max}$  влияют следующие факторы: форвакуумное или выпускное давление  $p_v$ , быстрота действия форвакуумного насоса  $S_v$ , скорость вращения насоса Рутса  $n$ , отношение  $k_{th}$  и адиабатический показатель экспоненты  $k$  откачиваемого газа.  $\Delta p_{max}$  увеличивается при увеличении  $p_v$  и  $S_v$  и уменьшается при увеличении  $n$  и  $k_{th}$ . Максимальный перепад между форвакуумным и входным давлениями  $p_v - p_a$  во время непрерывной работы не должен превышать определенное значение в зависимости от типа насоса. Эти значения находятся в диапазоне 130...50 мбар. Однако максимальный допустимый перепад давления для непрерывной работы может превышать на короткое время. При использовании специальных конструкций, использующих охлаждение газа, высокий перепад давления становится допустимым при непрерывной работе.

### Типы двигателей, используемых в насосах Рутса

В качестве привода используются стандартные двигатели, устанавливаемые на фланец. Ведущий вал уплотняется радиальными уплотнениями (манжетами) с масляным уплотнением, работающими на понижение износа для защиты ведущего вала. Могут использоваться фланцевые двигатели любого класса защиты, напряжения или частоты.

Внутренние течи для таких насосов составляют менее  $<10^{-4}$  мбарл/с.

Для улучшения герметичности (понижения внутренних течей) до  $<10^{-5}$  мбарл/с насосы Рутса оборудуются герметичными двигателями. Ротор

устанавливается в вакууме на ведущем валу насоса и отделяется от статора герметичной немагнитной трубкой. Обмотка статора охлаждается вентилятором, установленным на приводе двигателя. При такой конструкции уплотнения вала больше не требуются, т.к. износа не будет. Использование насоса Рутса с герметичным двигателем особенно рекомендуется при откачке сверхчистых, токсичных или радиоактивных газов и паров.

### Обеспечение допустимого перепада давления

Для стандартных насосов Рутса измерения должны проводиться так, чтобы гарантировать, что максимальный допустимый перепад давления между входным и выпускным портами, обеспечиваемый конструкцией, не будет превышен. Это достигается или с помощью переключателя давления, который включает и выключает насос в зависимости от входного давления, или с помощью перепускного клапана в байпасном (обходном) трубопроводе насоса Рутса (см. рис. 2.20 и 2.21). Использование перепускного клапана в байпасе насоса Рутса является более надежным решением. Подпружиненный клапан устанавливается для ограничения перепада давления для данного насоса. Это гарантирует, что насос Рутса не будет перегружен и может работать в любом диапазоне давления. На практике это означает, что насос Рутса можно включать вместе с форвакуумным насосом при атмосферном давлении. Если во время технологического процесса давление повысится, то это не повлияет на совместную работу, т.е. в этих условиях насос Рутса не выключится.

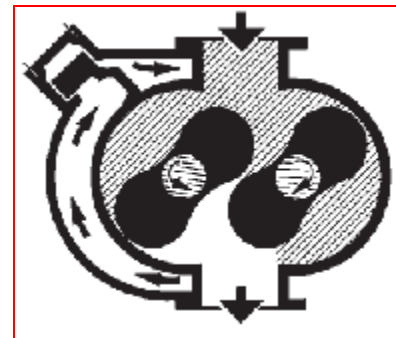


Рисунок 2.20. Поперечное сечение насоса Рутса с байпасным трубопроводом

### Предварительное охлаждение (рис. 2.22)

В насосах Рутса с предварительным охлаждением процесс сжатия происходит так же как и в обычных насосах Рутса. Т.к. большие перепады давления требуют большую мощность, которая при данной скорости и перепаде давления между входным и выходным портами прямо пропорциональна теоретической работе при сжатии и различным потерям мощности. Процесс сжатия обычно заканчивается после открытия рабочей камеры в направлении выходного порта. В этот момент нагретый поток газа при высоком давлении

нии течет в рабочей камере и сжимает транспортируемый объем газа. В случае с предварительным охлаждением этот процесс сжатия выполняется заблаговременно. Перед тем, как ротор откроет рабочую камеру в направлении выходного порта, сжатый и охлажденный газ втечет в рабочую камеру через канал предварительного охлаждения. В результате роторы вытолкнут среду через выходной порт. Охлажденный газ, который при одноступенчатом сжатии берется из атмосферы и проходит через предварительный охладитель, а при многоступенчатом сжатии берется ниже охладителя, выполняет предварительное сжатие и удаляет тепло сжимаемого в этот момент газа за счет «внутреннего охлаждения».

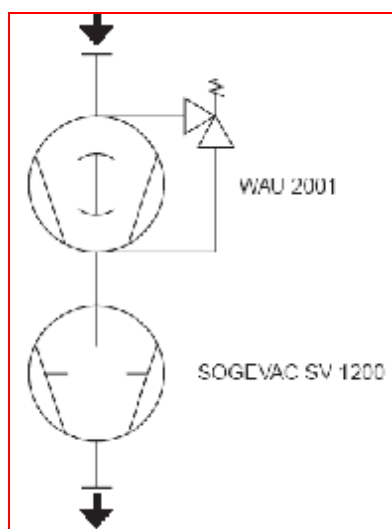
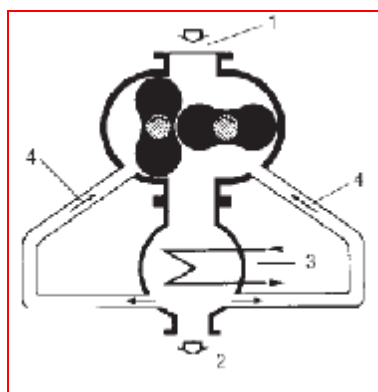


Рисунок 2.21. Вакуумные диаграммы – насос Рутса со встроенным байпасным трубопроводом и форвакуумный насос



1. входной порт
2. выхлопной порт
3. газоохладитель
4. поток холодного газа

Рисунок 2.22. Схема насоса Рутса с предварительным охлаждением

### 2.1.3.2 Когтевые насосы

Как и насосы Рутса когтевые насосы входят в группу сухих поршневых (ротационных) компрес-

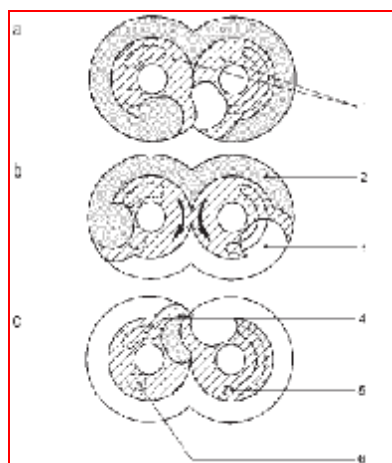
сионных насосов. Эти насосы могут иметь несколько ступеней. Их роторы имеют форму когтей.

**Принцип конструкции** когтевых насосов объясняется с начала на примере 4-ступенчатой конструкции. Поперечное сечение внутри корпуса насоса имеет форму двух частично перекрывающихся цилиндров (рис. 2.23). Внутри этих цилиндров расположены два свободно вращающихся ротора на каждой ступени насоса: (1) с их когтями и углублениями, вращающимися в противоположные стороны относительно их вертикальных осей. Роторы синхронизированы с помощью передачи так же как и насосы Рутса. Чтобы обеспечить оптимальное уплотнение зазоры между ротором в центре корпуса и между стенками очень маленький: чуть более 0,01 мм. Роторы периодически открывают и закрывают входные (5) и выходные (4) щели. В начале рабочего цикла в положении а правый ротор только что открыл входную щель (5). Газ втекает в постоянно увеличивающееся входное пространство (3) в положении b, пока правый ротор не закроет входную щель (5) в положении с. После оба когтя проходят через центральную позицию, вошедший газ сжимается в камере компрессии (2) (положение а), пока левый ротор не откроет выходную щель (4) (положение b), чтобы выпустить газ. Сразу после начала сжатия (положение а) входная щель (5) открывается, и газ снова втекает в формирующееся входное пространство (3) (положение b). Втекание и выпуск газа выполняется во время двух полупериодов. Каждый ротор проворачивается дважды во время полного рабочего цикла. Между ступенями откачки расположены промежуточные диски с каналами потоков, которые работают со стороны выхода верхней ступени на вход следующей ступени, так что все стороны входа и выхода выровнены по вертикали относительно друг друга (см. рис. 2.24). Тогда как в насосах Рутса входящий газ откачивается через насос при постоянном объеме, а сжатие происходит только в форвакуумном трубопроводе (см. раздел 2.1.3.1), когтевой насос сжимает газы уже в рабочей камере, пока ротор не открыл выхлопную щель. На рис. 2.25 показаны средние значения давления на каждой ступени откачки насоса DRYVAC при входном давлении 1 мбар. Чтобы соответствовать различным требованиям LEYBOLD производит две серии когтевых насосов, которые различаются по типу используемого процесса сжатия:

1) многоступенчатые насосы с внутренним сжатием для полупроводниковой промышленности (серия DRYVAC),

2) двухступенчатые насосы без внутреннего сжатия для химической промышленности (серия ALLEX).





- |                         |                                       |
|-------------------------|---------------------------------------|
| 1. роторы               | 4. выхлопная щель                     |
| 2. камера компрессии    | 5. входная щель                       |
| 3. входное пространство | 6. газ продувки промежуточной ступени |

Рисунок 2.23. Принцип работы

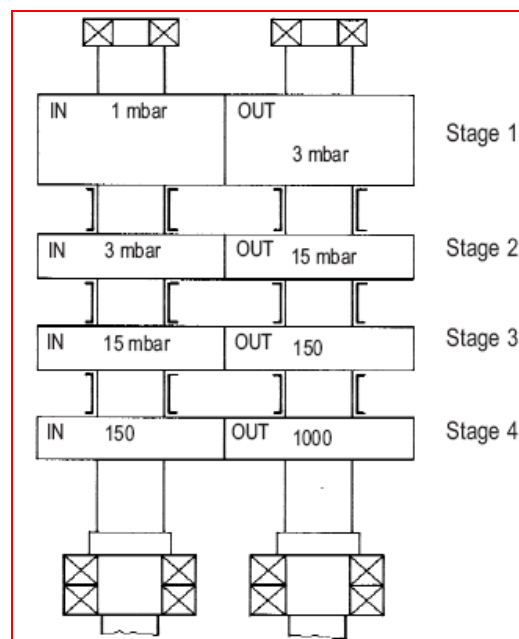


Рисунок 2.25. Давления на ступенях насоса

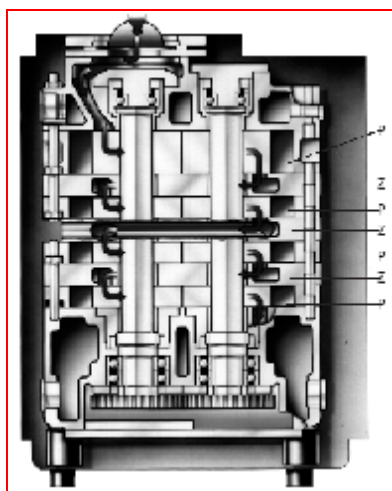


Рисунок 2.24. Конструкция насоса и направление потока газа  $P$  – ступень откачки,  $Z$  – среднее кольцо

На рис. 2.26 и 2.27 представлены отличия в конструкциях – зависимость давления от объема рабочей камеры.

На рис. 2.26 показана компрессия насоса с внутренним сжатием. Давление повышается до тех пор, пока выходная щель не будет открыта. Если в этой точке выходное давление не будет достигнуто, в пространство сжатия внезапно попадут горячие выхлопные газы. Т.к. объем будет уменьшаться, газ выйдет при выхлопном давлении. Работа, затраченная на сжатие, представлена областью под кривой  $p-V$  1-2-3-4. При сжатии всегда выделяется тепло. В сухих компрессионных насосах небольшое количество тепла может быть потеряно на корпусе из-за низкой плотности газа. Это приводит образованию высокой температуры внутри насоса. Эксперименты показали, что сильнее всего нагреваются роторы. На рис. 2.27 представлен принцип изохорического сжатия. Здесь сжатие достигается не за счет уменьшения объема рабочей камеры, а за счет напуска холодного газа, который подается с внешней стороны после завершения процесса всасывания. Это аналогично напуску газобалласта при открытии клапана газобалласта после завершения фазы всасывания. Из диаграммы ясно, что при изохорическом сжатии работа, затрачиваемая на сжатие, должна возрасти, но вместо горячего газа для напуска используется холодный. Этот метод прямого охлаждения газа приводит к значительному снижению температуры ротора. Насосы этого типа рассмотрены в разделе 2.1.3.2.2.

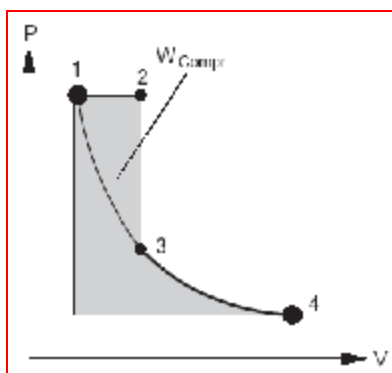


Рисунок 2.26. Кривая сжатия когтевого насоса с внутренним сжатием

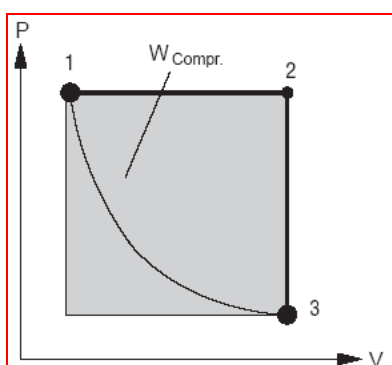


Рисунок 2.27. Кривая сжатия когтевого насоса без внутреннего сжатия (изохорическое сжатие)



1. входной порт
2. передняя панель
3. кнопка питания

Рисунок 2.28. Насос DRYVAC

### 2.1.3.2.1 Когтевые насосы с внутренним сжатием для полупроводниковой промышленности (серия DRYVAC)

#### Конструкция насоса DRYVAC

Из-за работы, затрачиваемой на сжатие на отдельных ступенях откачки, многоступенчатым когтевым насосам требуется водяное охлаждение на 4<sup>-ой</sup> ступени для отведения тепла. Т.к. рабочие камеры не содержат смазочных и уплотни-

тельных веществ, привод и нижний вал насоса смазываются перфторполиэфиром PFPE. Редуктор визуально герметически отделен от рабочей камеры поршневыми кольцами и манжетами вала. Подшипники в верхней части смазываются PFPE смазкой. Для защиты подшипников и уплотнений валов от агрессивных веществ подается барьерный газ. Управляемая система водяного охлаждения позволяет управлять температурой корпуса в широком диапазоне, т.к. насос работает с различными газами. Конструкция 4<sup>-ой</sup> ступени позволяет работать с несколькими быстротами откачки и типоразмерами оборудования насосов DRYVAC 25, 50, 100 м<sup>3</sup>/ч:

- a) базовая модель для неагрессивных газов чистых технологических процессов, DRYVAC 25B, 50B и 100B (рис. 2.29.a)
- b) модель для полупроводниковой промышленности DRYVAC 25P, 50P и 100P (рис. 2.29.b)
- c) модификация системы со встроенной системой самодиагностики DRYVAC 50S и 100S
- d) модификация системы со встроенной системой самодиагностики, допускающей повышение быстроты действия при низких давлениях DRYVAC 251S и 501S (рис. 2.29c).

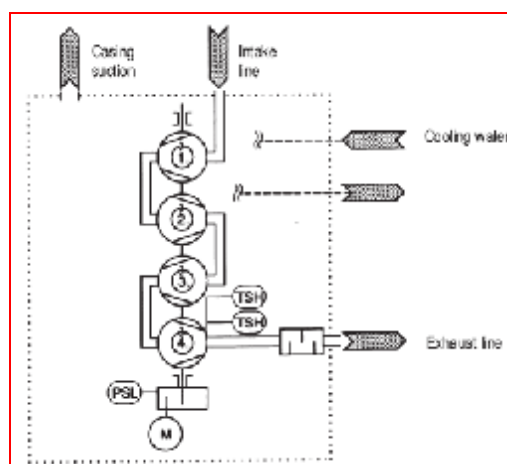


Рисунок 2.29a. Вакуумная схема DRYVAC B

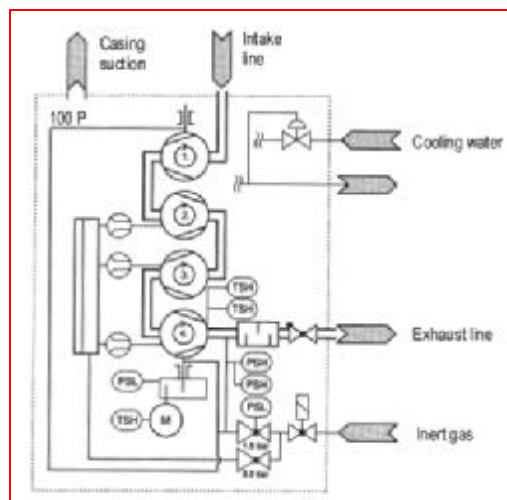


Рисунок 2.29b. Вакуумная схема DRYVAC P

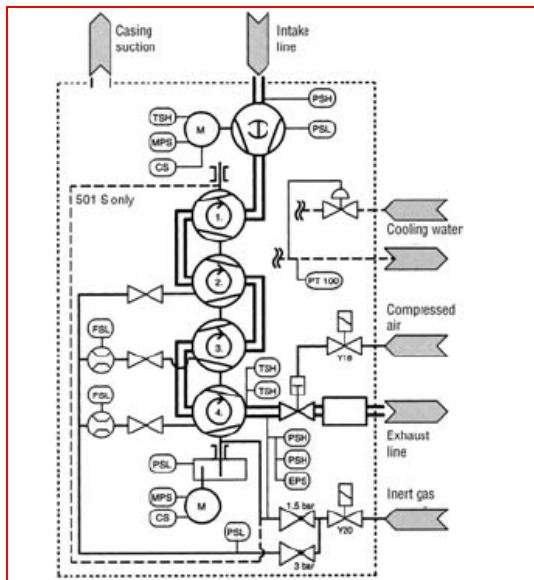


Рисунок 2.29с. Вакуумная схема DRYVAC S

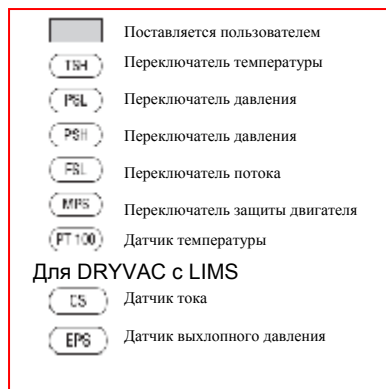


Рисунок 2.30. Обозначения на рис. 2.29.

Предельное давление, получаемое с помощью насосов DRYVAC 251S и 501S – по сравнению с моделями без встроенных насосов Рутса – примерно на порядок ниже (от  $2 \cdot 10^{-2}$  мбар до  $3 \cdot 10^{-3}$  мбар), производительность так же значительно выше. Конечно, возможно напрямую установить LEYBOLD RUVAC на фланце моделей DRYVAC. Для полупроводниковых процессов в камеры подшипников часто заливается PTFEмасло.

Семейство насосов DRYVAC является классическим примером сухих компрессионных насосов, которые желательно использовать в полупроводниковой промышленности, поэтому к насосам предъявляются особые требования. В полупроводниковых процессах, как и в большинстве областей применения вакуума, неизбежно образование частиц и пыли во время технологического процесса и/или сжатия откачиваемых веществ при атмосферном давлении в насосе. Для когтевых вакуумных насосов возможна откачка частиц через насос, так называемый пневмотранспорт. Это предотвращает оседание частиц и образование слоев внутри насоса, и снижает риск заклинивания когтевых роторов. Необходимо соблюдать осторожность, чтобы гарантировать, что

скорость потока газа внутри отдельных ступеней откачки все время больше, чем установленная скорость частиц в потоке газа. Как показано на рис. 2.31 скорость частиц зависит от их размера. Скорость текущего газа  $V_{gas}$  во время фазы сжатия дается в выражении:

$$V_{Gas} = \frac{q_{pV}}{p \cdot A} \cdot \frac{\text{мбар} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}}{\text{мбар} \cdot \text{см}^2} = \frac{10 \cdot q_{pV}}{p \cdot A} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (2.22)$$

$q_{pV}$  = расход газа,  $p$  = давление,  $A$  = площадь поверхности.

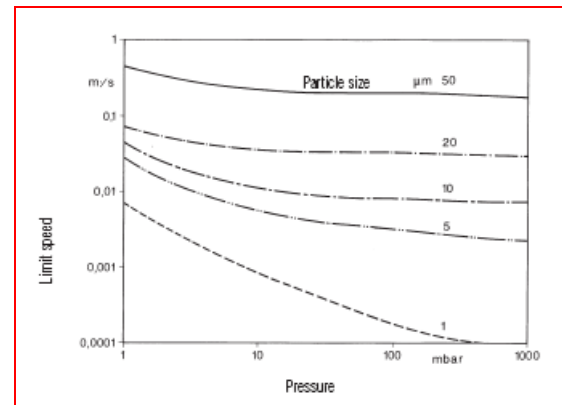


Рисунок 2.31. скорость частиц как функция давления (параметр – размер частиц)

Можно видеть, что с повышением давления скорость откачиваемого газа падает и достигает скорости частиц в потоке газа (рис. 2.32). Это означает, что есть риск осаждения частиц в рабочей камере насоса и в результате – ухудшение работы и повышение давления. Потенциальная возможность образования частиц из газовой фазы возрастает при увеличении уровня сжатия. Чтобы размер формирующихся частиц оставался маленьким, их скорость низкой, а скорость газа высокой, в насос подается дополнительное количество газа через промежуточные диски (газ продувки). Для этого подаваемый газ продувки подается под давлением, соответствующим этой ступени откачки (см. рис. 2.32). Это поддерживает скорость потока газа достаточно высокой с учетом пневмотранспорта. Несмотря на то, что газ подается в насос от входа через 4 ступени откачки с промежуточными дисками до выхода, возможно снизить влияние газа продувки на предельное давление до минимума. Результаты испытаний показывают (рис.2.33), что влияние газа продувки на 4-ой ступени является, как и ожидалось, минимальным, т.к. между этой ступенью и входом расположены еще три ступени откачки. Подача газа продувки через 2-ую и 3-ью ступени (рис. 2.33) имеет сравнительно небольшое влияние на предельное давление, как это можно увидеть на кривой быстроты действия (рис. 2.34). В результате можно сказать, что образование час-

тиц возможно в большинстве CVD процессах (химического осаждения из газовой фазы). При использовании сухих компрессионных когтевых вакуумных насосов, управляемая подача газа продувки через промежуточные диски является лучшим средством для предотвращения формирования слоев осажденных частиц. При использовании этого метода можно отметить несколько эффектов:

- Подаваемый газ продувки разбавляет откачиваемую смесь веществ, реакции образования частиц не происходит, или они затормаживаются.
- Вероятность взрыва в результате самовозгорания частиц значительно снижается.
- Частички, которые образуются в насосе, удаляются из насоса за счет пневмотранспорта
- При использовании газа продувки потери быстроты действия и предельного давления минимальны.

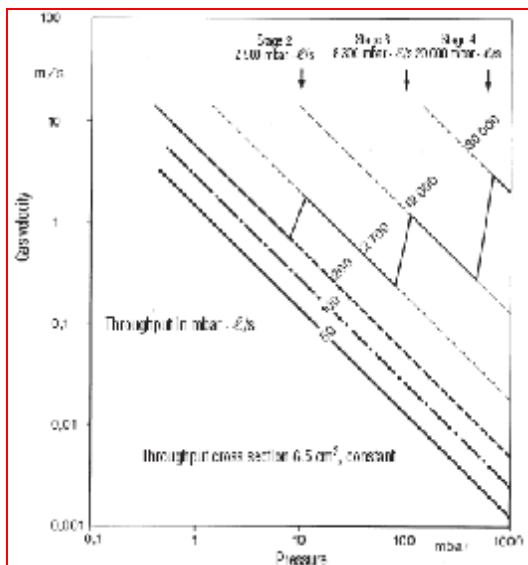


Рисунок 2.32. Скорость газа  $V_g$  при сжатии без продувки (слева) и с продувкой (справа) на 2, 3 и 4 ступенях

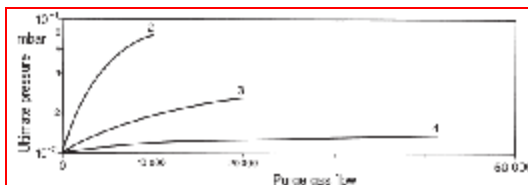


Рисунок 2.33. Предельное давление DRYVAC 100S как функция газового потока в стадиях 2-4

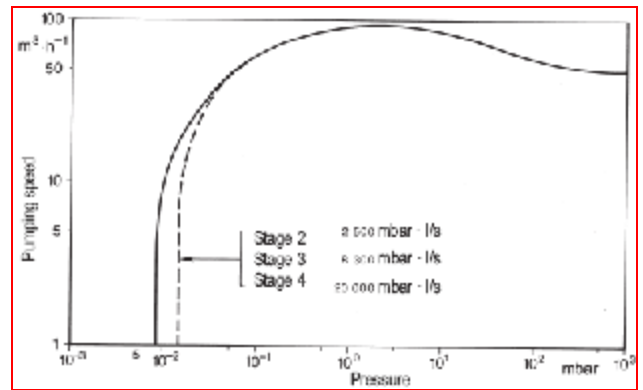


Рисунок 2.34. Быстрота действия с и без газа продувки зависимости от потока газа продувки на 2 и 3 ступенях

### 2.1.3.2.2 Когтевые насосы без внутреннего сжатия для химической промышленности (ALL-ех)

Для химической промышленности требуются высоконадежные вакуумные насосы, в которых не будет утечек загрязненных материалов (загрязненного масла или воды). При соблюдении этих условий эксплуатационные расходы такого вакуумного насоса будут ниже по сравнению с затратами на защиту окружающей среды (утилизацию загрязненного масла или воды). Для работы простых и надежных насосов серии ALL-ех производства LEYBOLD нет ограничений по потоку пара или диапазону давления во время непрерывной работы. Насосы серии ALL-ех могут без проблем работать при входном давлении в диапазоне 5...1000 мбар.

#### Конструкция насоса ALL-ех

Конструкция двух ступенчатых насосов показана на рис. 2.35. Поток газа сверху вниз через вертикально расположенные ступени откачки обеспечивает возможность впрыска конденсатов и жидкости, которые могут образовываться. Корпус насоса имеет водяное охлаждение и выполняет охлаждение первой ступени. Между газовой камерой и каналом поступления охлаждающей воды нет уплотнений, поэтому нельзя исключить попадание охлаждающей воды в камеру откачки. Конструкция сопротивления взрыву входного блока основана на принципе безопасности для защиты от внутреннего взрыва, который следует учитывать при прямом охлаждении холодным газом (см. принцип действия).

Характерной особенностью насосов ALL-ех является то, что подшипники обоих валов расположены только в редукторе. Со стороны откачки валы свободны (закреплены консольно). Эта простая конструкция позволяет пользователю быстро разобрать насос для прочистки и обслуживания без необходимости использования специальных инструментов.

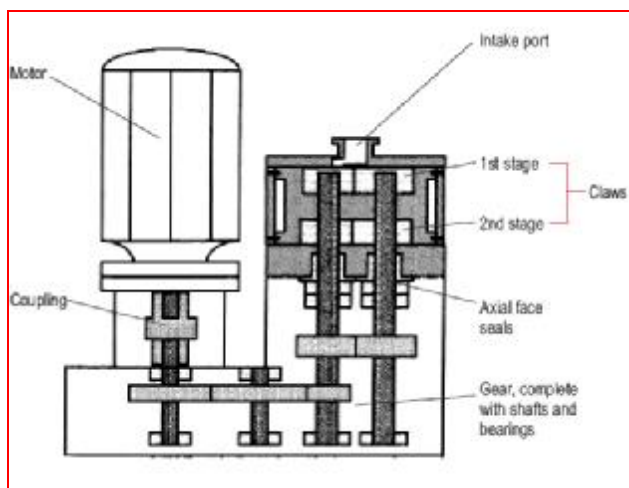
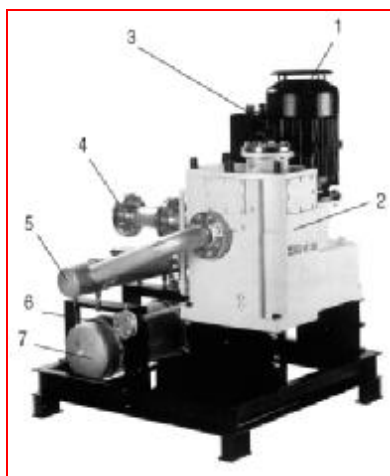


Рисунок 2.35. Схема насоса ALL-ex

Чтобы гарантировать надлежащее уплотнение откачиваемой среды, в камере откачки на валах установлены уплотнения осевого типа (манжеты), применяемые в химической промышленности. Уплотнения этого типа могут отделять жидкость от жидкости, т.к. насос становится нечувствительным к образованию конденсата. На рис. 2.36 показаны компоненты насоса ALL-ex, входящие в комплект поставки с газоохладителем и резервуаром.



- |                   |                                |
|-------------------|--------------------------------|
| 1. двигатель      | 5. охладитель выхлопных газов  |
| 2. насос          | 6. соединения охлаждающей воды |
| 3. входной порт   | 7. резервуар охлаждения        |
| 4. выпускной порт |                                |

Рисунок 2.36. Насос ALL-ex

### Принцип действия

Изохорическое сжатие, которое так же работает на ограничение температуры, образующейся при сжатии, особенно на ступени со стороны атмосферы, и которое защищает от внутреннего сжатия, выполняется за счет напуска в рабочую камеру холодного газа из закрытого цикла охлаждения газа (рис. 2.37). На рис. 2-38 1 означает начало входного цикла при открытии входной щели через управляющее ребро правого ротора. Технологические газы втекают в рабочую камеру, размер которой увеличивается.

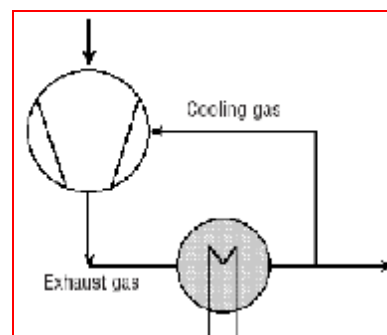


Рисунок 2.37. циркуляция холодного газа в насосе ALL-ex с охладителем (конденсатором)

Процесс входа газов осуществляется за счет перепада давления, создаваемого за счет увеличения объема рабочей камеры. Максимальный объем достигается при  $\frac{1}{4}$  оборота роторов (см. рис. 2.38-2). После окончания процесса входа управляющее ребро левого ротора откроет вход холодного газа, и в это же время управляющее ребро правого ротора еще раз откроет входную щель (рис. 2.38-3). На рис. 2.38-4 управляющее ребро левого ротора определит нагнетание газа, который сжат до 1000 мбар с холодным газом, и в это же время управляющее ребро правого ротора снова завершит процесс входа газа.

Общая эмиссия из системы не увеличивается за счет большого количества холодного газа, т.к. закрытый цикл охлаждения обеспечивается с помощью внешнего газоохладителя или конденсатора (см. рис. 2.37). Горячий выхлопной газ проходит через охладитель и частично возвращается в виде холодного газа для предварительного охлаждения в насос. Насос берет необходимое количество охлажденных технологических газов для напуска обратно в рабочую камеру в пространство сжатия. Этот процесс, однако, не влияет на быстроту действия насоса ALL-ex, т.к. к началу напуска газа процесс входа газа уже закончен. Обозначение охладителя как конденсатора предусматривает простую регенерацию растворителя. Метод прямого охлаждения газа, т.е. напуск снаружи (вместо горячих выхлопных газов) в рабочую камеру холодного газа приводит к тому, что температура ротора насоса ALL-ex ниже температуры смеси, указанной в стандарте в качестве ExT3 – температуры стабильной откачки при любых рабочих условиях. Насосы ALL-ex полностью соответствуют требованиям химической промышленности относительно защиты от внутреннего взрыва. Допускается попадание некоторого количества жидкости в насос ALL-ex без образования слоя в насосе или откачка слоя жидкости в насосе. Жидкости оказываются в насосе после завершения установки (периодический процесс) или при продолжении процесса во время короткой фазы блокировки. Насос ALL-ex можно запустить даже после длительного простоя насоса или с рабочей камерой, полностью заполненной жидкостью. На рис. 2.39 представлена быстрота действия насоса ALL-ex 250. На-

сос имеет номинальную быстроту действия 250 м<sup>3</sup>/ч и предельное давление <10 мбар. При 10 мбар он будет откачивать с быстротой действия

100 м<sup>3</sup>/ч. Непрерывное рабочее давление насоса может быть 1000 мбар. Потребляемая мощность – 13.5 кВт

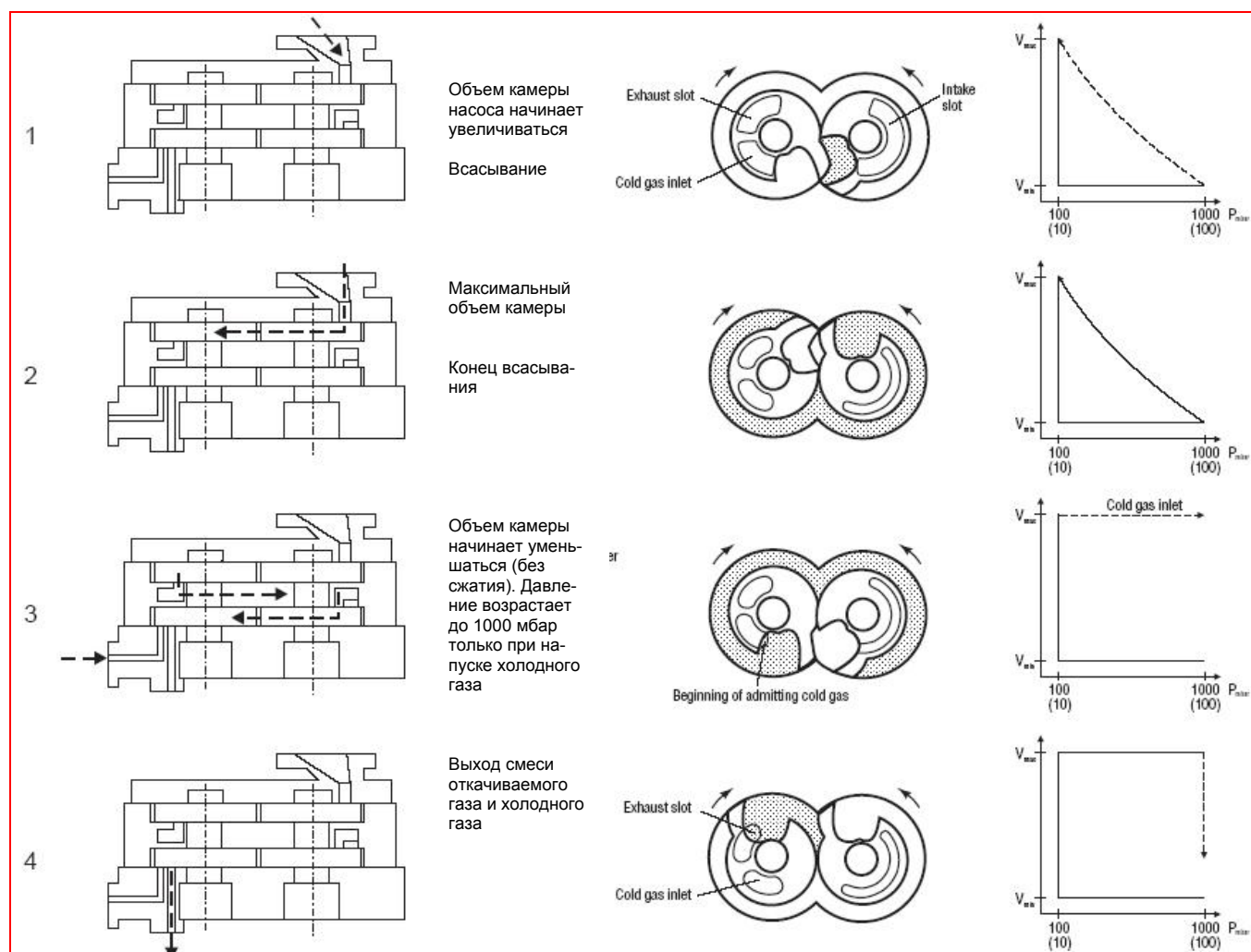


Рисунок 2.38. Схема принципа откачки насосов ALL-ex (когтевые насосы без внутреннего сжатия)

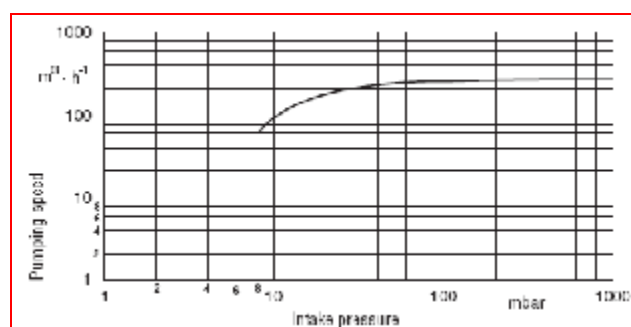


Рисунок 2.39. Быстрота действия насоса ALL-ex 250

## 2.1.4 Принадлежности для пластинчато-роторных насосов с масляным уплотнением

Во время вакуумных технологических процессов в вакуумной камере могут находиться вещества, вредные для вакуумных насосов.

### Удаление паров воды

Водяной пар появляется во влажных вакуумных процессах. Он может привести к нанесению воды во входном трубопроводе. Если конденсат достигает входного порта насоса, то происходит загрязнение масла насоса. В этом случае характеристики насосов с масляным уплотнением ухудшатся. Более того, пары воды, прошедшие через выходной клапан насоса могут конденсироваться в выходном трубопроводе. Конденсат может (если выхлопной трубопровод сконструирован некорректно) подниматься обратно внутрь насоса через выхлопной клапан насоса. Поэтому при наличии паров воды или других паров рекомендуется использовать **конденсирующие ловушки**. Если к выходу насоса не подключен насос газобалласта (т.е. маленький пластинчато-роторный насос), то рекомендуется устанавливать **выхлопные фильтры**. Они улавливают пары масла (масляный туман), выходящий из насоса.

Некоторые насосы оборудованы фильтрами со сменными картриджами, которые не только удерживают масляный туман, но и очищают масло, циркулирующее в насосе. Когда количество присутствующих паров воды превышает допустимость паров воды для насоса, следует всегда устанавливать конденсатор между насосом и вакуумной камерой (см. раздел 2.1.5).

#### Удаление пыли

Твердые частицы, такие как пыль и грязь, значительно повышают износ поршней и внутренних поверхностей насосов. Если есть опасность попадания твердых частиц в насос, то на входной порт насоса следует устанавливать **сепараторы** или **пылевые фильтры**. Сегодня выпускаются не только стандартные фильтры, имеющие большой корпус, но и сетчатые фильтры, устанавливаемые в центрирующее кольцо маленького фланца. При необходимости рекомендуется расширять поперечное сечение с помощью KF адаптера.

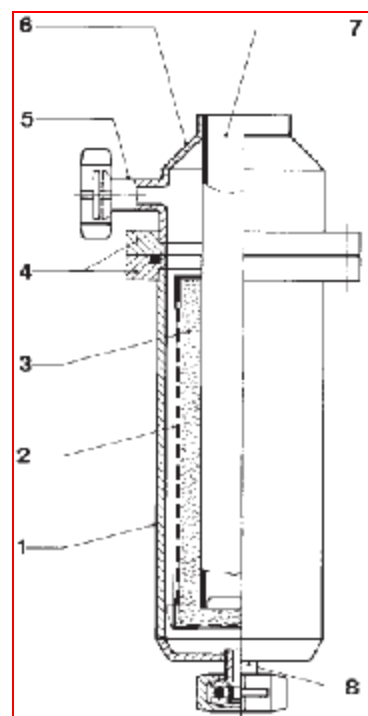
#### Удаление паров масла

На предельное давление сильно влияет наличие паров воды и углеводородов из масла насоса. Даже в двухступенчатых пластинчато-роторных насосах нельзя избежать небольшого обратного потока молекул масла в вакуумную камеру. Для получения безмасляного или сверхвысокого вакуума, например, с помощью магниторазрядных или турбомолекулярных насосов с форвакуумной стороны этих насосов так же необходимо обеспечить отсутствие паров масла. Чтобы получить безмасляный вакуум используют **адсорбционную ловушку для среднего вакуума** (рис. 2.40), заполненную подходящим адсорбентом (т.е. с LINDE молекулярным ситом 13X), установленную на входном порту масляного форвакуумного насоса. Принцип работы сорбционной ловушки аналогичен адсорбционному насосу. Дополнительная информация представлена в разделе 2.1.8. Если форвакуумные адсорбционные ловушки установлены на входе пластинчато-роторного насоса с масляным уплотнением, работающим непрерывно, рекомендуется параллельно устанавливать две адсорбционные ловушки, разделив их клапаном. Эксперименты показывают, что цеолиты, используемые в качестве адсорбентов, теряют большую часть емкости адсорбции через 10-14 дней работы, после которых можно использовать другую, восстановленную ловушку, и процесс может не прерываться. При нагреве адсорбционной ловушки, неподключенной к трубопроводу откачки, пары покинут поверхность цеолита, и их можно будет откачать с помощью дополнительного насоса. При работе, предотвращается понижение адсорбционной ловушки.

#### Снижение эффективной скорости откачки

Все фильтры, конденсаторы, сепараторы, клапаны во входном трубопроводе снижают эффек-

тивную быстроту действия насоса. На основе проходимости (или сопротивления) клапанов, сообщаемой производителями, можно рассчитать действующую быстроту действия насоса (см. раздел 1.5.2).



1. корпус
2. корзина адсорбента
3. молекулярное сито (адсорбент)
4. уплотняющие фланцы
5. входной порт с маленьким фланцем
6. верхняя секция
7. баллон нагревателя /охладителя
8. соединение со стороны вакуумного насоса с маленьким фланцем

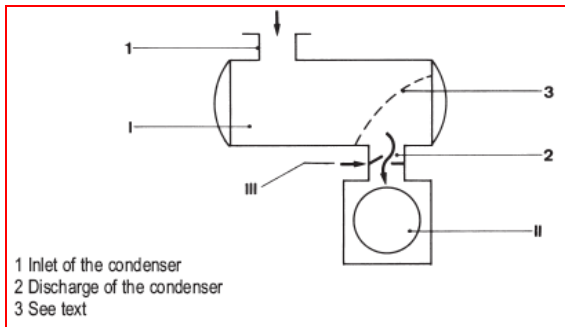
Рисунок 2.40. поперечное сечение адсорбционной ловушки для области среднего вакуума

## 2.1.5 Конденсаторы

Для откачки большого количества водяных паров конденсатор является самым экономичным насосом. Как правило, конденсатор имеет водяное охлаждение, температура воды которой значительно ниже точки росы водяных паров, и гарантируется экономичная конденсация или откачка. Для охлаждения может использоваться соляной раствор или охладители (NH<sub>3</sub>, фреон).

При откачке паров воды в производственных условиях всегда имеется некоторое количество воздуха, который или присутствует в парах или поступает через течи (это суждение справедливо не только для паров воды, но и для любых паров). Поэтому необходим насос с газобалластом, который всегда работает в комбинации, как насос Рутса (рис. 2.41). Функцией газобалластного насоса является откачка фракций воздуха, который составляет только малую часть в смеси с парами воды без одновременной откачки большинства

паров воды. Понятно, что в комбинации конденсатора и газобалластного насоса в стационарных условиях, определение потока в области низкого вакуума, не достигается без дополнительного анализа. Простое использование формул неадекватно, т.к. не учитывается источник или бессточность поля потока (конденсатор является стоком на процесса конденсации). Это имеет существенное значение. На практике комбинация «неработающего» конденсатора и газобалластного насоса может быть неоправданна из-за обивинения конденсатора в бездействии.



1. вход конденсатора
2. выход конденсатора
3. см. текст

Рисунок 2.41. Конденсатор I с газобалластным насосом II для откачки большого количества паров воды в области низкого вакуума, III – настраиваемый дроссель

При подборе комбинации конденсатор – газобалластный насос необходимо учитывать следующее:

а) количество откачиваемого с парами воды газа (воздуха) не слишком большое. Парциальное давление воздуха не более 5% на выходе конденсатора. Отмеченное накопление воздуха происходит на передней поверхности конденсатора. затем конденсатор не может достичь всей своей производительности (емкости) – см. раздел 2.2.3 для одновременной откачки газов и паров.

б) давление паров воды на выходе конденсатора – входе газобалластного насоса (когда количество газа, описанное в разделе 2.2.3 не откачивается одновременно) не должно быть больше допустимости паров воды для газобалластного насоса. Если, этого нельзя избежать на практике, на выходе конденсатора ожидается более высокое парциальное давление паров воды, можно установить дроссель между выходом конденсатора и входным портом газобалластного насоса. Проводимость дросселя должна регулироваться (раздел 1.5.2) так, чтобы с полным дросселированием давление на входном порту насоса не могло быть выше допустимости паров воды. Можно использовать другие охладители или понизить температуру охлаждающей воды, чтобы давление паров воды было ниже требуемого значения.

В математическом уравнении комбинации конденсатора и газобалластного насоса можно считать, что в конденсаторе нет потерь давления,

что общее давление на входе конденсатора 1 равно общему на выходе конденсатора  $p_{tot2}$ :

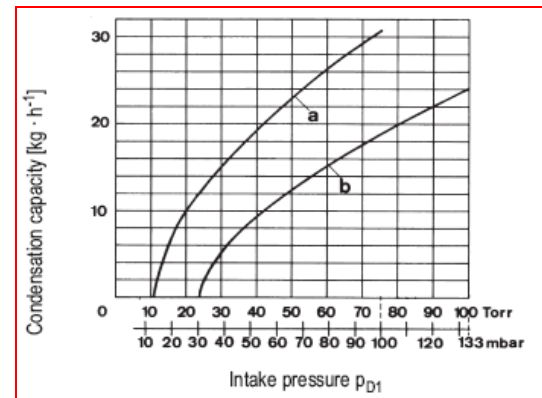


Рисунок 2.42. Зависимость емкости конденсации (площадь поверхности для конденсации 1 м<sup>2</sup>) от входного давления  $p_{D1}$  паров воды.

Кривая a – температура охлаждающей воды 12°C, кривая b – температура охлаждающей воды 25°C. Давление 3 бар, расход воды 1 м<sup>3</sup>/ч

$$p_{tot1} = p_{tot2} \quad (2.23)$$

Общее давление равно сумме парциальных давлений воздуха  $p_p$  и паров воды  $p_V$

$$p_{p1} + p_{V1} = p_{p2} + p_{V2} \quad (2.23.a)$$

В ходе работы конденсатора давление паров воды  $p_{D2}$  всегда ниже, чем на входе. В уравнении 2.23 парциальное давление воздуха на выходе  $p_{p2}$  должно быть выше чем на входе  $p_{p1}$  (рис. 2.43), если нет дросселя.

Более высокое парциальное давление воздуха на выходе конденсатора  $p_{p2}$  образуется за счет накопления воздуха, который присутствует на входе, и приводит к стационарному выравниванию потока. Из этого накопленного воздуха газобалластный насос (с дросселем) в равновесии удалит даже поток со входа 1 через конденсатор. Все расчеты основаны на уравнении 2.23a, для которого следует знать количество откачиваемых паров и газов, их состав и давление. Размер конденсатора и насоса можно рассчитать, когда эти два количества не зависят друг от друга. На рис. 2.42 представлен результат расчета. В качестве примера взят конденсатор, имеющий площадь поверхности конденсации 1 м<sup>2</sup>, входное давление  $p_{V1}$  40 мбар, емкость конденсации 15 кг/ч чистых паров воды, если количество газов очень мало. Расход воды 1 м<sup>3</sup>/ч при давлении 3 бар и температуре 12°C. Необходимая быстрота действия насоса зависит от существующих рабочих условий, особенно от размера конденсатора. В зависимости от производительности (КПД) кон-



денсатора парциальное давление паров воды  $p_{V2}$  лежит выше давления насыщения  $p_S$ , которое зависит от температуры охладителя. Для воды при температуре 12°C давление  $p_S$  равно 15 мбар – см. табл. 13 в разделе 9. Соответственно, преваляющее давление воздуха  $p_{p2}$  в конденсаторе так же будет варьироваться. Для больших конденсаторов  $p_S \approx p_{V2}$  давление воздуха  $p_{p2}$  будет больше, т.к.  $p_p \cdot V = const$ , а объем воздуха маленький. Поэтому необходим относительно небольшой газобалластный насос. Однако, если конденсатор маленький,  $p_{V2} > p_S \cdot p_{p2}$ , требуется относительно большой газобалластный насос. Количество воздуха во время откачки не является постоянным, а изменяется в широком диапазоне, поэтому необходимо, чтобы быстрота откачки газобалластного насоса, работающего с конденсатором, могла отрегулироваться в известных пределах.

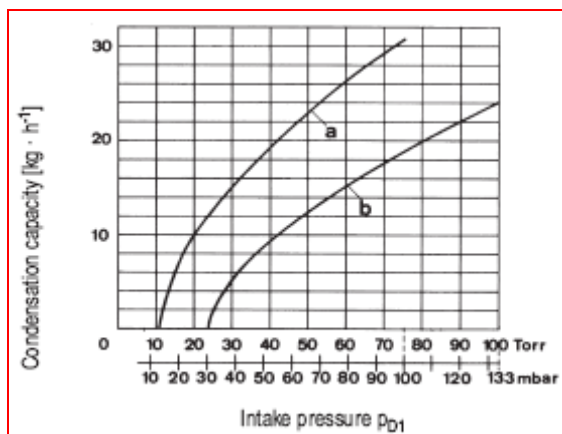


Рисунок 2.43. Схема распределения давления в конденсаторе. Линии соответствуют условиям в конденсаторе при небольшом перепаде давления  $p_{tot2} < p_{tot1}$ , а штрихи – идеальному состоянию  $p_{tot2} \approx p_{tot1}$ ,  $p_D$  – парциальное давление паров воды,  $p_L$  – парциальное давление воздуха

На практике используют следующее:

а) **дресселирующее сечение** располагается между насосом и конденсатором, который можно закрыть во время форвакуумной откачки. Сопротивление потока в дросселе должно быть регулируемым, чтобы можно было понижать эффективную быстроту Действия насоса до требуемого значения. Это значение можно рассчитать, используя уравнения в разделе 2.2.3.

б) рядом с **большим насосом** для форвакуумной откачки устанавливается **поддерживающий насос**, размер которого соответствует минимальному количеству газа. Целью поддерживающего насоса является поддержание оптимального ра-

бочего давления во время технологического процесса.

с) **необходимое количество воздуха** попадает во входной трубопровод насоса через клапан переменного потока. Это дополнительное количество воздуха работает как газобалласт, увеличивая допустимость паров воды насоса. Однако обычно это снижает емкость конденсатора. Более того, дополнительное количество воздуха приводит к дополнительному потреблению мощности (см. раздел 8.3.1.1) и масла. Т.к. производительность конденсатора ухудшается при слишком большом парциальном давлении воздуха в конденсаторе, напуск воздуха следует проводить за конденсатором.

Если время запуска процесса короче общего времени процесса, самым простым методом является использование форвакуумного и поддерживающего насоса. Процессы с сильно изменяющимися условиями требуют настраиваемого дросселя и настраиваемой подачи воздуха.

На входе газобалластного насоса всегда присутствует парциальное давление паров воды  $p_{V2}$ , которое больше или равно давлению насыщения паров воды при температуре охладителя. Идеальным случаем является только большой конденсатор. С учетом опыта и основных правил можно выделить два случая:

1) **откачка неконденсирующихся газов** с небольшим количеством паров воды. Размер конденсатора в комбинации с насосом определяется на основе откачки газов. Функцией конденсатора будет снижение давления паров воды на входе в газобалластный насос до значения допустимости паров воды.

2) **откачка паров воды** с небольшим количеством газа. Конденсатор более эффективен, т.к. обеспечивается минимально возможное парциальное давление газов в конденсаторе. Даже если давление паров воды в конденсаторе больше допустимости паров воды газобалластного насоса, для дросселирующей откачки газов требуется небольшой насос.

**Важное замечание:** во время процесса, если давление в конденсаторе падает ниже давления насыщенного пара для охладителя (в зависимости от его температуры), конденсатор надо заблокировать или собрать конденсат. Если этого не сделать, насос будет откачивать пары, сконденсированные в конденсаторе.

## 2.1.6 Пароструйные насосы

Выделяют группы насосов: эжекторные, такие как водоструйные насосы (давление 17...1013 мбар), парозежекторные насосы ( $10^{-3}$ ... $10^{-1}$  мбар) и диффузионные насосы (давление  $p < 10^{-3}$  мбар).



Эжекторные вакуумные насосы используются в основном для создания среднего вакуума. Диффузионные насосы используются для создания высокого и сверхвысокого вакуума. Оба типа насосов работают с быстрым потоком рабочей жидкости в виде пара или жидкости (водоструйные – с парами воды, парами масла или ртути). Принцип откачки всех пароструйных насосов основан на одном эффекте. Молекулы откачиваемого газа удаляются из камеры и попадают в струю рабочей жидкости, выходящую из сопла. Молекулы в струе рабочей жидкости передают импульс молекулам газа через столкновения в направлении потока. Таким образом, откачиваемый газ двигается в сторону пространства, имеющего большее давление.

В пароструйных насосах соответствующее давление паров поднимается во время работы и зависит от типа рабочей жидкости, температуры и конструкции сопла. Для паромасляных насосов оно может достигать 1 мбар в камере кипения. Выпускное давление в насосе должно быть достаточно низким, чтобы создавать поток пара. Чтобы обеспечить это, таким насосам требуется соответствующий форвакуумный насос, обычно механический. Струя пара не может попасть в камеру, т.к. конденсируется на внешних холодных стенках насоса после выхода из сопла.

В. Геде первым предложил откачивать газы при низких давлениях с помощью струи рабочей жидкости под высоким давлением, и таким образом перемещать молекулы газа из области низкого общего давления в область высокого общего давления. Это парадоксальное состояние создается потому, что струя пара изначально свободна от газов, поэтому газы из области высокого парциального давления газа (вакуумной камеры) могут проникать в область низкого парциального давления газа (струя пара). Этот принцип Геде был использован Лангмюром в 1915 г при создании первого диффузионного насоса. Первый диффузионный насос был ртутным диффузионным насосом, изготовлен из стекла и металла. В шестидесятых годах ртуть была полностью заменена маслом. Чтобы получить как можно более высокую скорость струи пара он предложил выпускать пар из сопла со сверхзвуковой скоростью. Рабочая жидкость в виде струи пара конденсируется на холодной стенке корпуса насоса, а транспортируемый газ сжимается обычно на одной или нескольких последующих ступенях перед тем, как будет удален форвакуумным насосом. Коэффициент компрессии, который можно получить в пароструйных насосах очень высокий: если давление на входе в насос  $10^{-9}$  мбар, а выпускное давление  $10^{-2}$  мбар, то коэффициент компрессии будет  $10^7$  мбар.

В основном предельное давление пароструйных насосов ограничивается значением парциального давления жидкости при рабочей температуре

насоса. На практике его пытаются улучшить за счет установки экранов или холодных ловушек. Они являются конденсаторами между насосом и вакуумной камерой, и поэтому предельное давление, которое можно получить в вакуумной камере, теперь будет ограничено парциальным давлением рабочей жидкости при температуре ловушки (экрана).

Типы пароструйных насосов разделяются по плотности рабочей жидкости на выходе из сопла с высоковакуумной стороны насоса:

1. пар низкой плотности

#### **Диффузионные насосы**

Паромасляные насосы (серии LEYBOLDIF, DI, DIP), Ртутные диффузионные насосы

2. пар высокой плотности

Водоструйные, Паромасляные /эжекторные, Парортутные насосы

3. **комбинированные насосы**

Паромасляные/ парозжекторные насосы

4. **парозжекторные (водоструйные) насосы**

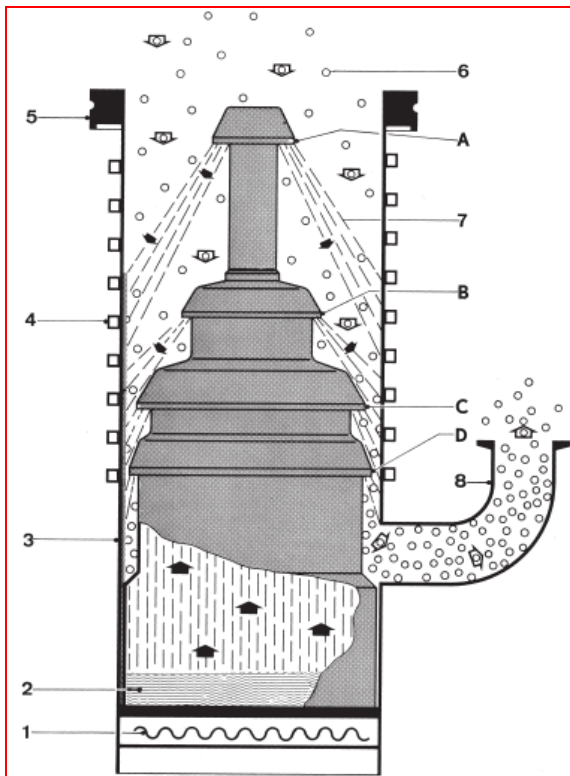
#### **Охлаждение пароструйных насосов**

Мощность нагревателя, которая постоянно подается для испарения рабочей жидкости в пароструйном насосе, должна рассеиваться за счет эффективного охлаждения. Энергия, необходимая для откачки газов и паров, минимальна. Внешние стенки диффузионного насоса обычно охлаждаются водой. Небольшие паромасляные насосы могут иметь принудительное воздушное охлаждение, т.к. низкая температура стенок не имеет решающего значения, как в ртутных насосах. Паромасляные насосы могут хорошо работать при температуре стенок  $30^{\circ}\text{C}$ , а стенки ртутных насосов должны охлаждаться до  $15^{\circ}\text{C}$ . Чтобы защитить насос от опасной неисправности в подаче охлаждающей воды, следует установить индикатор циркуляции воды. Следует избегать испарения рабочей жидкости со стенок.

#### **2.1.6.1 Паромасляные (диффузионные) насосы**

Эти насосы (рис. 2.44) состоят из корпуса 3 с охлаждаемыми стенками 4 и  $3^{\times} \dots 4^{\times}$  ступенчатой системой сопел A-D. Масло в качестве рабочей жидкости находится в кипятыльнике 2 и испаряется из него с помощью электрического нагревателя 1. Потоки пара рабочей жидкости поднимаются по трубам и выходят со сверхзвуковой скоростью через кольцевые сопла A-D.





1. нагреватель
  2. кипятильник
  3. корпус насоса
  4. обмотка охлаждения
  5. высоковакуумный фланец
  6. молекулы газа
  7. струя пара
  8. форвакуумное соединение
- A,B,C,D – сопла

Рисунок 2.44. Принцип работы диффузионного насоса.

После выхода поток в форме зонтика достигает стенок, где происходит конденсация рабочей жидкости. Жидкий конденсат стекает вниз в виде тонкой пленки вдоль стенки и в итоге попадает обратно в кипятильник. Из-за растекания струи плотность потока относительно низкая. Диффузия воздуха и других газов (паров) в струю происходит так быстро, что несмотря на высокую скорость струи становится виртуально полностью насыщена откачиваемой средой. Поэтому в широком диапазоне давлений диффузионные насосы имеют высокую быстроту действия. Она практически постоянна при давлении  $\leq 10^{-3}$  мбар, т.к. воздух при таком низком давлении не может влиять на струю, и направление струи не изменяется. При высоком входном давлении направление струи меняется, в результате чего быстрота откачки понижается пока, при  $10^{-1}$  мбар, не становится неизмеримо мала.

Выпускное (форвакуумное) давление так же влияет на струю пара и становится определяющим, если его значение превысит критическое значение. Этот предел давления называется **максимальным выпускным давлением**. Производительность выбранного форвакуумного на-

соса должна быть такой (раздел 2.3.2), чтобы количество газа, выходящее через диффузионный насос откачивалось без повышения выпускного давления, близкого максимальному выпускному давлению или чуть превышающего его.

Достижимое предельное давление зависит от конструкции насоса, давления паров рабочей жидкости, максимальной возможной конденсации рабочей жидкости и чистоты камеры. Более того, обратный поток рабочей жидкости в вакуумную камеру следует максимально снизить с помощью экранов или холодных ловушек (раздел 2.1.6.4).

#### Дегазация рабочей жидкости насоса

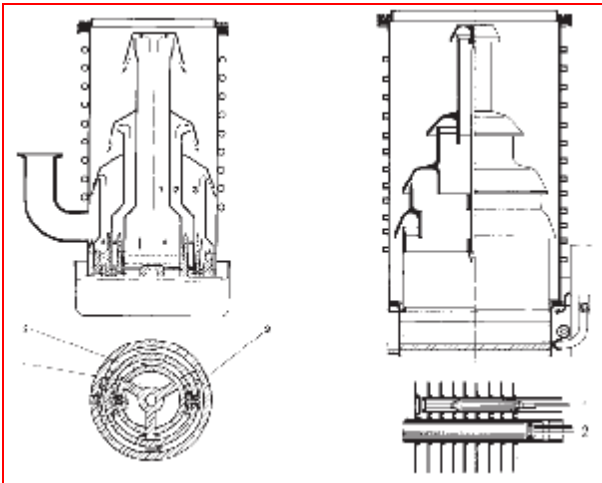
Для диффузионных насосов необходимо проводить процесс дегазации рабочей жидкости (масла) перед тем, как она вернется обратно в бойлер. При нагреве продукты разложения могут подниматься в насос. Загрязнения со стенок так же могут попасть в насос или скапливаться внутри насоса на первой ступени. Эти составляющие рабочей жидкости, если их не удалить из насоса, могут значительно ухудшать предельное давление диффузионного насоса. Поэтому рабочую жидкость необходимо очищать от примесей и адсорбированных газов.

Этот процесс очистки является функцией **ступени дегазации**, через которую проходит циркулирующая рабочая жидкость перед возвратом в бойлер. На ступени дегазации удаляется большинство летучих примесей. Дегазация достигается за счет точно управляемого распределения температуры в насосе. Сконденсированная рабочая жидкость, которая стекает по охлаждаемым стенкам в виде тонкой пленки нагревается до  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что позволяет летучим компонентам испариться и покинуть насос благодаря откачке форвакуумным насосом. Поэтому в рабочей жидкости после процесса испарения содержатся только нелетучие компоненты.

#### Быстрота действия

Значение предельной быстроты действия  $S$  диффузионного насоса, т.е. быстрота действия на единицу площади действующей входной поверхности, зависит от нескольких параметров, включая положение и размер высоковакуумной ступени, скорость паров рабочей жидкости и молекулярной скорости  $\bar{C}$  откачиваемого газа (уравнение 1.17 в разделе 1.1). С помощью кинетической теории газов максимальная предельная быстрота откачки при комнатной температуре оценивается как  $S_{\max} = 11.6 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . Это выражение совпадает с удельной молекулярной проводимостью отверстия (см. уравнение 1.30 в разделе 1.5.3). Обычно быстрота Действия диффузионного насоса для легких газов выше, чем для тяжелых газов.

Чтобы определить производительность (КПД) диффузионных насосов, определяется так называемый НО коэффициент. Он равен отношению действующей быстроты действия к теоретической, максимально возможной скорости действия. Для диффузионных насосов производства LEYBOLD оптимальные значения составляют 0,3 (маленькие насосы) ... 0,55 (большие). LEYBOLD производит различные типы диффузионных насосов, конструкции некоторых представлены на рис.2.45.



а) фракционный насос LEYBOLDIFF  
1. центр  
2. среднее сечение  
3. внешняя часть кипятильника (фракционирование)

б) насос DI вид сбоку на внутренний нагреватель  
1. датчик –термостат  
2. нагревательный картридж

Рисунок 2.45. Диффузионные насосы производства LEYBOLD

### Насосы серии LEYBOLDIFF

Насосы этой серии оборудованы фракционирующим устройством. Выбираются различные компоненты рабочей жидкости так, чтобы в высоковакуумное сопло подавалась только фракция пара рабочей жидкости, имеющая наименьшее давление пара. Это гарантирует особенно низкое предельное давление. Фракционирование происходит за счет того, что масло после дегазации первым входит во внешнюю часть кипятильника, подающим пар на сопло с форвакуумной стороны. Здесь часть летучих компонентов испаряется. Уже очищенное масло поднимается до средней части кипятильника, где есть сопла. Здесь летучие компоненты удаляются в большом количестве. Когда масло достигает центральной части кипятильника, работающего с высоковакуумными соплами, масло очищено от летучих компонентов.

### Насосы серии DI

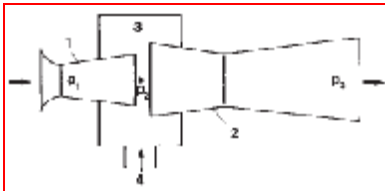
В этих насосах процесс испарения рабочей жидкости, организуется за счет конструкции нагрева-

теля, обеспечивающей постоянную высокую быстроту действия. Это нагреватель внутреннего типа, состоящий из нагревательных картриджей, в которые вставлены трубки с припаянными теплопроводными панелями. Трубки изготовлены из нержавеющей стали и вертикально приварены к корпусу насоса выше уровня масла. Теплопроводные панели изготовлены из меди и частично погружены в рабочую жидкость. Эти части панелей спроектированы так, чтобы рабочая жидкость могла испаряться интенсивно, но без задержки на кипячение. Эти части панелей выше уровня масла дают дополнительную энергию пару. Благодаря специальной конструкции системы нагрева нагревательные картриджи можно заменить даже когда насос еще горячий.

### 2.1.6.2 Эжекторные (бустерные) насосы

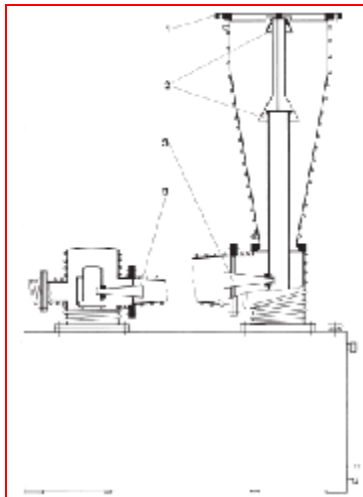
Принцип откачки парэжекторной ступени показан на рис. 2.46. Рабочая жидкость под высоким давлением  $p_1$  входит в сопло 1 (сопло Лавалья). Здесь оно **увеличивается** до давления  $p_2$ . При этом увеличении внезапное изменение энергии сопровождается увеличением скорости. Струи пара рабочей жидкости с увеличенной скоростью проходят через область смешивания 3, соединенную с откачиваемой камерой 4. Здесь молекулы газа из камеры следуют за струей пара. Смесь паров рабочей жидкости и газа входит в сопло 2 (Вентури). Здесь смесь **сжимается** до выпускного давления  $p_3$  с одновременным снижением скорости. Пары рабочей жидкости конденсируются на стенках насоса, а газ удаляется форвакуумным насосом. Бустерный насос идеально подходит для откачки большого количества газов или паров при давлении  $1...10^{-3}$  мбар. Более высокая плотность струи пара гарантирует, что диффузия газа в струю пара будет происходить медленнее, чем в диффузионных насосах, поэтому только внешние слои струи пара будут заполнены газом. Более того, поверхность, через которую происходит диффузия меньше из-за специальной конструкции сопла. Поэтому предельная быстрота действия такого насоса меньше, чем у диффузионного. Т.к. откачиваемый газ по соседству со струей находится под высоким входным давлением, он будет влиять на направлении потока, а оптимальные условия возможны только при определенном входном давлении. Поэтому быстрота действия не будет постоянной с понижением входного давления. Из-за высокой скорости и плотности струи пара бустерный насос может переносить газы при относительно высоком выпускном давлении. Предельное выпускное давление составляет несколько мбар. Бустерные насосы, используемые сегодня в вакуумной технологии, в основном имеют одну или более диффузионных ступеней и несколько эжекторных. Система сопел бустерного насоса состоит из расположенных каскадом двух диффузион-

ных и двух эжекторных ступеней (рис. 2.47). Диффузионные ступени обеспечивают высокую быстроту действия при давлении  $10^{-4} \dots 10^{-3}$  мбар (рис. 2.48), а эжекторные – высокую производительность при высоком давлении (рис. 2.49) и высокое предельное выпускное давление. Нечувствительность к пыли и парам, растворенным в рабочей жидкости достигается за счет больших кипятильника и резервуара рабочей жидкости. В кипятильнике может находиться большое количество примесей, что не повлияет на характеристики откачки.



1. сопло
2. рассеиватель сопла
3. камера смешивания
4. соединение с вакуумной камерой

Рисунок 2.46. работа парозежекторного насоса



1. высоковакуумный порт
2. диффузионные ступени
3. эжекторные ступени

Рисунок 2.47. бустерный насос

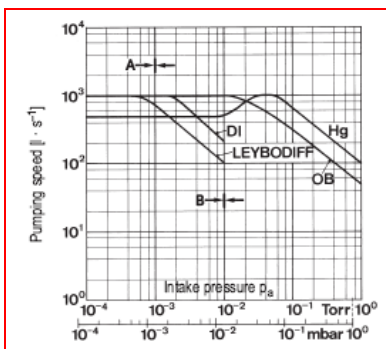


Рисунок 2.48. Зависимость скорости действия различных насосов от входного давления относительно номинальной скорости действия 1000 л/с. конец рабочего диапазона А - парозежекторных насосов, В – диффузионных.

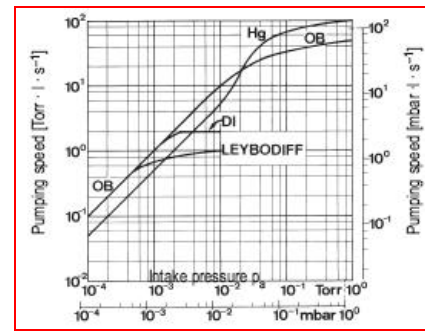


Рисунок 2.49. скорости действия различных насосов

### 2.1.6.3 Рабочие жидкости

#### а) Масла

Подходящей рабочей жидкостью паромасляных насосов являются минеральное, силиконовое масла и масло на основе полифенил-эфиров. К маслам предъявляются строгие требования только когда они контактируют со специфическими жидкостями. Свойства масел, такие как давление паров, термическая и химическая стойкость, особенно по воздуху, определяют выбор масла для данного типа насоса или получения определенного предельного давления. Давление паров масла, используемого в насосе, ниже ртути. Органические рабочие жидкости более чувствительны, чем ртуть, т.к. масла могут разлагаться при длительном воздействии воздуха. Силиконовые масла выдерживают более длительное воздействие воздуха в работающем насосе.

Типовым минеральным маслом является **DIFFELEN** (легкое, обычное и ультра). Различные типы этого масла удовлетворяют жестким допускам высококачественной продукции (см. каталог).

**Силиконовые масла (DC704/ DC705)** являются органическими полимерами. Имеют высокую стойкость к окислению при проникновении воздуха и особые параметры термостабильности.

Масло **DC705** имеет очень низкое давление паров и подходит для получения очень низкого предельного давления ( $< 10^{-10}$  мбар).

**ULTRALEN** является полифенилэфиром. Его рекомендуется использовать в тех случаях, когда требуются рабочие жидкости повышенной стойкости к окислению, а силиконовые масла могут влиять на технологический процесс.

**APIEZON AP201** – масло особой термической и химической стойкости, обеспечивающее высокую быстроту действия вместе с парозежекторным насосом, работающим в области среднего вакуума (предельное давление около  $10^{-4}$  мбар)

#### б) Ртуть

Ртуть очень подходит в качестве рабочей жидкости. Этот химический элемент во время испарения не сжимается и не окисляется при контакте с воздухом. Но при комнатной температуре имеет относительно высокое давление паров ( $10^{-3}$  мбар). Для достижения более низкого предельного давления необходимо использовать ловушки с жидким азотом. С их помощью можно получить предельное давление  $10^{-10}$  мбар. Из-за токсичности ртути представляет опасность для окружающей среды и теперь почти не используется в диффузионных насосах. LEYBOLD производит ртутные диффузионные насосы только на заказ. Кривые давления паров рабочих жидкостей приведены в разделе 9, рис. 9.12.

#### 2.1.6.4 Обратный поток рабочей жидкости и его подавление (экраны, ловушки)

В струе пара из верхнего сопла диффузионного насоса молекулы рабочей жидкости двигаются не только в направлении охлаждаемых стенок насоса, но и обратно из-за межмолекулярных соударений. Эти молекулы могут попадать прямо вакуумную камеру. Для насосов серии LEYBOLDIFF и DI обратный поток масла составляет несколько миллиграмм в минуту на каждый  $\text{см}^2$  площади входного сечения. Чтобы максимально снизить обратный поток, можно одновременно использовать несколько методов:

- сопло с высоковакуумной стороны и часть корпуса вокруг него должны быть спроектированы так, чтобы путь молекул от выхода из сопла до стенки насоса был как можно короче.
- способ охлаждения стенок насоса должен обеспечивать максимальную конденсацию паров рабочей жидкости, а после конденсации жидкость должна быстро стекать.
- необходимо установить одну или несколько ловушек (или экранов) между насосом и камерой, в зависимости от требуемого предельного давления.

В конструкции ловушек или экранов необходимо соблюдать два главных требования. Первое: все молекулы обратного потока пара рабочей жидкости должны оседать (конденсироваться) как можно быстрее на внутренней поверхности этих устройств. Второе: поверхность конденсации должна быть спроектирована и расположена так, чтобы проводимость потока ловушки (экрана) была как можно большей для откачиваемого газа. Оба этих требования обозначаются термином оптимальной темноты (непрозрачности). Это означает, что частички не могут пройти через ловушку, не ударившись о стенку, хотя ловушка имеет большую проводимость. Воплощение этой идеи приводит к созданию ловушек различной конструкции с этими требованиями.

**Экран «холодная шапка»** спроектирован таким образом, что может устанавливаться сразу над высоковакуумным соплом. Экран изготавливается из металла с высокой теплопроводностью с хорошим тепловым контактом с охлаждающимися стенками насоса, что означает на практике обеспечение на экране температуры охлаждающей воды или, если насос имеет воздушное охлаждение, температуры окружающей среды. В больших насосах экран «холодная шапка» имеет водяное охлаждение и установлен на корпусе насоса. При установке экрана эффективная быстрота действия диффузионного насоса снижается примерно на 10%, а обратный поток снижается почти на 90...95%.

**Тарельчатый маслоотражатель** состоит из концентрически расположенных тарелок и центральной пластины. При соответствующем водяном охлаждении большинство свободных паров масла могут здесь задерживаться. Эффективная быстрота действия диффузионного насоса снижается как минимум на 50%. Экраны этого типа выпускаются LEYBOLD двух различных форм: с обмоткой охлаждения из нержавеющей стали или так называемые экраны Astrotorus с медными охлаждающими вставками. Корпус экрана изготовлен из нержавеющей стали.

Для небольших диффузионных насосов с воздушным охлаждением используются колпачки (**пластинчатые экраны**). При воздушном охлаждении экран состоит из медной пластины с медными перемычками, крепящимися к стенке. Во время работы диффузионного насоса температура экрана поддерживается равной окружающей.

#### Безмасляный вакуум

Если требуется получить безмасляный вакуум с помощью диффузионного насоса, необходимо использовать заливную ловушку с жидким азотом, и температура ловушки достигает  $-196^\circ\text{C}$ .

Низкотемпературные экраны или заливные (азотные) ловушки всегда используются в качестве холодной шапки. На ней конденсируется большая часть обратного потока масла, так что неизбежные потери рабочей жидкости при конденсации на поверхности с низкой температурой сведены к минимуму. При длительной работе на месте холодной шапки желательнее установить экран с водяным охлаждением или шевронный экран между диффузионным насосом и азотной ловушкой (см. рис. 2.50).

Компания LEYBOLD производит заливные ловушки  $\text{LN}_2$ . Их можно использовать в том случае, когда ловушка работает в течение длительного времени без необходимости доливки жидкого азота. Повышение температуры в баллоне с хладагентом во время работы незначительно, хотя уровень жидкости падает, значительной десорбции конденсата не происходит.



Расположенная со стороны откачки часть ловушки изготовлена из меди. Низкая температура этой панели гарантирует, что большая часть сконденсированной рабочей жидкости останется в жидком состоянии и может стечь обратно в насос. Сегодня масла, используемые для работы в диффузионных насосах, имеют очень низкое давление паров при комнатной температуре (например DIFFELEN легкий -  $2 \cdot 10^{-8}$  мбар, DC705 –  $4 \cdot 10^{-10}$  мбар). Совместное использование заливной азотной ловушки и экрана с азотным охлаждением позволяет получить полностью безмасляный вакуум.

Однако на практике не удается достичь полного подавления обратного потока. Всегда будет несколько молекул рабочей жидкости, которые в результате соударений друг с другом, проникнут в камеру без контакта с охлажденными поверхностями экрана или ловушки. Более того, всегда присутствуют несколько летучих компонентов рабочей жидкости, которые не задержатся на охлажденных поверхностях. Температура и адсорбированные на поверхности камеры молекулы пара определяются давлением в камере. Если поверхность не полностью покрыта адсорбированными молекулами рабочей жидкости, давление паров только незначительно повлияет на давление в камере.

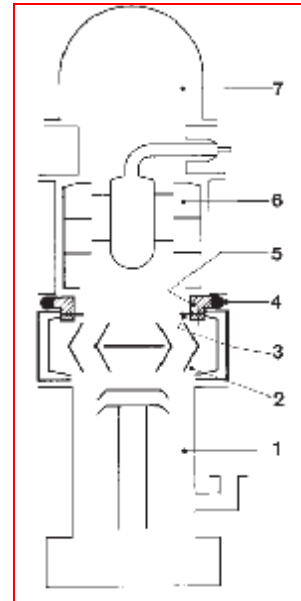
Через некоторое время (время до начала повышения давления) образуется непрерывный слой молекул масла, а предельное давление определяется давлением пара рабочей жидкости при температуре стенок вакуумной камеры. Это время повышения давления может составлять от нескольких часов до нескольких дней, в зависимости от использования заливной ловушки/экрана с низкой температурой.

Масло может проникать в камеру не только в виде паров, но и в виде тонкой пленки, т.к. масло собирается на стенках камеры.

При установке **антимиграционного барьера** (см. рис. 2.50), выполненного из полимеров (Тефлона, материала, который не впитывает масло и может нагреваться до  $200^{\circ}\text{C}$ ) можно эффективно предотвратить дальнейшее проникновение масла. В большинстве случаев барьер устанавливается над экраном (см. рис. 2.50).

#### Замечание:

Необходимо заметить, что характеристики обратного потока масла, указанные в каталоге продукции LEYBOLD применимы только для диффузионных насосов при непрерывной работе. Короткое включение верхнего сопла насоса не повлияет на паровую струю. Вместо струи пара будет распыление масла во всех направлениях в течении нескольких секунд, а влияние обратного потока будет значительным. При включении диффузионного насоса степень обратного потока возрастает.



1. диффузионный насос с экраном – холодной шапкой (охлаждение при контакте)
2. шевронный экран
3. антимиграционный барьер
4. уплотняющая прокладка
5. кольцо подшипника
6. заливная азотная ловушка LN<sub>2</sub>
7. вакуумная камера

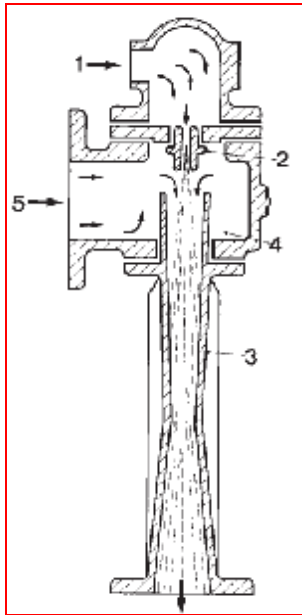
Рисунок 2.50. Экран, антимиграционный барьер и заливная ловушка над диффузионным насосом

#### 2.1.6.5 Парозжекторные насосы

В класс пароструйных насосов включены не только насосы, использующие потоки пара с большой скоростью в качестве рабочей жидкости, но и насосы со струей жидкости. Самым простым и дешевым вакуумным насосом является **водоструйный (водометный) насос**. Как в пароструйном насосе (см. рис. 2.46 и 2.51), струя жидкости сначала выходит из сопла и затем в результате турбулентности смешивается в камере смешивания. В результате движение смеси воды и газа стекает вниз в трубку Вентури. Общее предельное давление в камере, откачиваемой таким насосом, определяется давлением паров воды и, например, при температуре  $15^{\circ}\text{C}$  будет составлять около 17 мбар.

Более высокая быстрота действия и низкое предельное давление достигается при использовании **эжекторного насоса**. На рис. 2.51 представлено сечение одноступенчатого насоса. Номера позиций соответствуют указанным на рис. 2.46. На практике обычно несколько ступеней откачки устанавливаются каскадом. Для лабораторных исследований используются двухступенчатые насосы, состоящие из парозжекторной ступени и водоструйной (форвакуумной) ступени. Обе ступени изготавливаются из стекла. Водоструйная форвакуумная ступень позволяет работать без дополнительного форвакуумного насоса. С помощью струи пара при избыточном давлении можно откачать

вакуумную камеру до предельного давления около 3 мбар. Конденсат из струи стекает через сливное приспособление. Водоструйная ступень насоса имеет водяное охлаждение для повышения эффективности работы. Эжекторные насосы особенно подходят для лабораторных работ, в частности при откачке агрессивных паров. Эжекторные насосы, которые работают при давлении в несколько мбар особенно рекомендуются для откачки лабораторных перегонных аппаратов и подобных устройств, когда давления водоструйного насоса недостаточно. В этом случае рекомендуется использование ротационного насоса.



1. вход струи
2. сопло
3. диффузор
4. область смешивания
5. соединение с вакуумной камерой

Рисунок 2.51. Принцип работы эжекторного(струйного)насоса

Даже несмотря на низкие затраты водоструйные и эжекторные насосы в лабораториях все чаще заменяются на диафрагменные насосы из-за проблем по защите окружающей среды при использовании воды в качестве рабочей жидкости. Растворители, вводимые в воду, можно удалить только при комплексной очистке (дистилляции воды).

### 2.1.7 Турбомолекулярные насосы

Принцип молекулярного насоса, известный с 1913 г, состоит в том, что частички газа, откачиваются через соударение с быстро движущимися поверхностями ротора, что придает им импульс в нужном направлении потока. Поверхности ротора, обычно в форме дисков со стационарными поверхностями статора формируют промежуточное пространство, по которому газ перемещается к выпускному порту. В первоначальном **молекулярном насосе Геде** и его модификациях про-

странство (каналы) было очень узким, что являлось причиной трудностей конструирования и высокой степени чувствительности к механическим загрязнениям.

В конце пятидесятых стало возможным (через конструкции турбин и модификацию идеи Геде) создать технологически приемлемый насос, названный **турбомолекулярным**. Пространство между дисками статора и ротора были сделаны порядка нескольких миллиметров, что могло значительно повысить отклонения. Следовательно, достигалась большая надежность работы. Однако значительный эффект откачки достигался только тогда, когда окружная скорость (на внешнем крае) пластин ротора достигала порядка средней тепловой скорости молекул откачиваемого газа. Кинетическая теория газов описывает скорость  $\bar{c}$  в выражении 1.17:

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}}$$

в котором наблюдается зависимость скорости от типа газа (то есть от молярной массы  $M$ ). Результаты расчетов в кгс-единицах измерения ( $R = 83.14 \cdot 10^6$  мбар·см<sup>3</sup>/моль·К) приведены в табл. 2.4.

Газ	Молярная масса М	Тепловая скорость, м/с
H <sub>2</sub>	2	1761
He	4	1245
H <sub>2</sub> O	18	587
Ne	20	557
CO	28	471
N <sub>2</sub>	28	471
Воздух	28.96	463
O <sub>2</sub>	32	440
Ar	40	394
CO <sub>2</sub>	44	375
CCl <sub>3</sub> F (F11)	134.78	68

Таблица 2.4. Зависимость скорости  $\bar{c}$  от молярной массы  $M$

Зависимость быстроты действия от типа газа в то время как ( $S \sim \bar{c} \sim 1/\sqrt{M}$ ), зависимость компрессии  $k_0$  при нулевой производительности,  $k_0 \sim e^{\sqrt{M}} \log k_0 \sim \sqrt{M}$  как показано в экспериментально установленном отношении на рис. 2.55.

Пример:  
Из теории следует, что

$$\frac{\log k_0(He)}{\log k_0(N_2)} = \sqrt{\frac{4}{28}} = \sqrt{\frac{1}{7}} = \frac{1}{2.65}$$

$$\Rightarrow \log k_0(N_2) = 2.65 \cdot \log k_0(He)$$



при  $k_0(He) = 3 \cdot 10^3$  из рис. 2.55 получим результат:

$$\log k_0(N_2) = 2.65 \cdot \log(3 \cdot 10^3) = 9.21$$

$$\text{или } k_0(N_2) = 1.6 \cdot 10^9$$

Это хорошо соответствует экспериментально определенному значению  $k_0(N_2) = 2.0 \cdot 10^8$  на рис. 2.55. Учитывая современную оптимизацию для отдельных ступеней ротора, это заключение больше не корректно для насоса. Приведенные на рис. 2.56 значения измерены для современного насоса TURBOVAC340M.

Для соответствия условию для турбомолекулярных насосов круговая скорость ротора должны быть того же порядка, что и  $\bar{C}$ . Скорость находится в диапазоне от 36000 об/мин для насосов, имеющих ротор большого диаметра (TURBOVAC1000) до 72000 об/мин для насосов с ротором маленького диаметра (TURBOVAC35/55). Столь высокие скорости обычно поднимают вопрос о надежности подшипников. Компания LEYBOLD предлагает три концепции подшипников, достоинства и недостатки которых состоят в следующем:

**\* стальные шарикоподшипники с масляной смазкой**

+ хорошая совместимость с частичками за счет циркуляции масла

- могут устанавливаться только вертикально

+ низкая стоимость обслуживания

**\* гибридные подшипники со смазкой**

+ могут устанавливаться в любом положении

+ подходят для мобильных систем

± воздушное охлаждение используется не во многих областях применения

+ нет необходимости добавлять/менять смазку (на весь ресурс подшипников)

**\* магнитный подвес / без смазки**

+ нет износа

+ не требуется техническое обслуживание

+ полностью безмасляные

+ низкий уровень шума и вибраций

+ возможность установки в любом положении.

**Стальные/керамические (гибридные) шарикоподшипники**

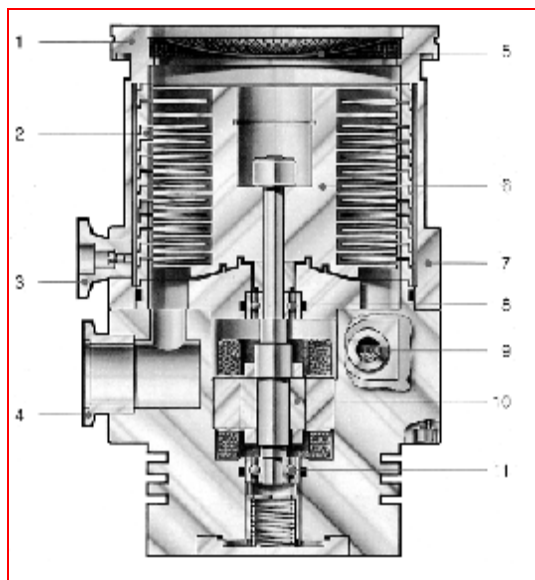
Даже минимальный зазор в тонкой пленке смазочного материала между шариками и поверхностями колец может (если используются материалы одного типа) привести к микросварке в точке контакта. Это сильно снижает ресурс подшипников. При использовании различных материалов, так называемых гибридных подшипников (поверхности – сталь, шарики – керамика) можно избежать эффекта микросварки.

Самой лучшей концепцией подшипников является магнитный подвес. LEYBOLD производит турбомолекулярные насосы на магнитном подвесе с 1976 г (широко известные серии 550M и 560M). В то время использовалось чистое действие магнитного подвеса (т.е. с электромагнитами). Достижения в электронике и использование постоянных магнитов (пассивный магнитный подвес), основанный на системе **System KFA Jülich** привело к широкому использованию магнитного подвеса. В этой системе ротор поддерживается в стабильном положении без контакта во время работы с помощью магнитных сил. Не требуется никакой смазки. Для исключения встраиваются так называемые подшипники приземления.

На рис. 2.52 показано сечение типового турбомолекулярного насоса. Насос является осевым компрессором вертикальной конструкции, действующей или откачивающей части, которая состоит из ротора 6 и статора 2. Турбинные лопатки расположены по окружности статора и ротора. Каждая пара пластин ротора – статора образуют одну ступень, поэтому блок состоит из множества ступеней, расположенных последовательно. Откачиваемый газ попадает прямо через входной фланец 1 и без потерь проводимости в действующую область откачки на верхние лопатки блока ротора – статора. Верх оборудован лопатками специально большего радиального размера, чтобы обеспечить большую площадь кольцевой поверхности. Газ, захватываемый этой ступенью, перемещается на ступни меньшей компрессии, лопатки которых имеют более короткий радиальный размер, где газ сжимается до выпускного (форвакуумного) давления. Ротор турбины 6 устанавливается на ведущий вал, поддерживаемый двумя прецизионными шарикоподшипниками (8 и 11), установленными в корпус двигателя. Вал ротора приводится в действие с помощью среднечастотного двигателя, установленного в форвакуумной области с ротором, так что нет необходимости вращать втулку вала при внешнем атмосферном давлении. Питание к двигателю и автоматическое управление обеспечивается с помощью внешнего, обычно твердотельного частотного преобразователя, который гарантирует очень низкий уровень шума. Для особых технологических процессов, например, в областях с повышенной радиацией, используются частотные преобразователи генератора двигателя.

Вертикальная конфигурация ротора – статора обеспечивает оптимальные условия потока газа на входе.





- |                                   |                                |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1. высоковакуумный входной фланец | 6. ротор                       |
| 2. статор                         | 7. корпус насоса               |
| 3. фланец напуска                 | 8. шарикоподшипник             |
| 4. выпускной форвакуумный фланец  | 9. соединение охлаждающей воды |
| 5. экран (от осколков)            | 10. трехфазный двигатель       |
|                                   | 11. шарикоподшипник            |

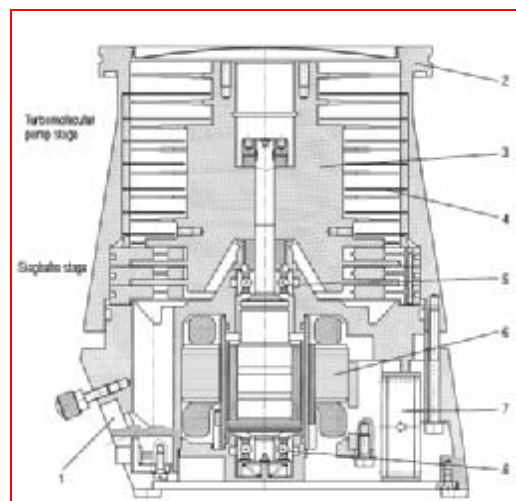
*Рисунок 2.52. Турбомолекулярный насос TURBOVAC151 с обычными подшипниками со смазкой*

Чтобы гарантировать отсутствие вибрации при работе на высоких скоростях вращения, турбины проходят динамическую балансировку при двух уровнях во время их сборки.

**Характеристики быстроты действия** (объемно-го потока) представлены на рис. 2.53. Быстрота действия остается постоянной на всем протяжении диапазона рабочего давления. Она понижается при входных давлениях порядка  $10^{-3}$  мбар, т.к. это пороговое значение означает переход из молекулярного режима течения в область ламинарного вязкостного режима течения газа. На рис. 2.54 представлены зависимости быстроты действия от рода газа.

**Коэффициент компрессии** (часто обозначается просто **компрессией**) турбомолекулярного насоса равен отношению между парциальным давлением одного компонента газа на форвакуумном (выпускном) фланце к давлению на высоковакуумном фланце: максимальная компрессия  $K_0$  вычисляется при нулевой производительности. По физическим причинам коэффициент компрессии турбомолекулярного насоса очень высокий для тяжелых молекул, но значительно ниже для легких молекул. Зависимость между компрессией и молекулярной массой показана на рис. 2.55. На рис. 2.56 представлены зависимости компрессии насоса TURBOVAC 340 для  $N_2$ , He,  $H_2$  от выпускного давления. Из-за высокого коэффициента компрессии для тяжелых молекул углеводородов, турбомолекулярные насосы могут прямо

подсоединяться к вакуумной камере без помощи одного или нескольких охлаждаемых экранов или ловушек, без риска измерения парциального давления углеводородов в вакуумной камере (безмасляный вакуум – см. рис. 2.57: спектры остаточных газов над насосом TURBOVAC 361). Т.к. парциальное давление водорода, получаемое ротационным форвакуумным насосом слишком низкое, турбомолекулярный насос может создать предельное давление примерно  $10^{-11}$  мбар, несмотря на небольшую компрессию для  $H_2$ . Чтобы создать столь низкое предельное давление необходимо строго соблюдать требования высоковакуумной технологии: вакуумная камера и верхняя часть турбомолекулярного насоса должны быть прогреты и необходимо использовать металлические уплотнения. При очень низких давлениях остаточный газ состоит в основном из  $H_2$ , выходящего из металлических стенок камеры. Спектр на рис. 2.57 показывает **состав остаточных газов** на входе в турбомолекулярный насос при давлении  $7 \cdot 10^{-10}$  мбар (по азоту). Видно, что количество  $H_2$  в общем количестве газа составляет примерно 90...95%. Фракция тяжелых молекул значительно снижена, а массы более 44 не определены. Важным критерием в спектре определения количества остаточных газов является измерение углеводородов из смазочных материалов, используемых в системе откачки. Конечно же, абсолютно безмасляный вакуум можно получить только в системах откачки, не содержащих смазочных материалов (т.е., например, турбомолекулярный насос с магнитным подвесом и сухой компрессионный форвакуумный насос). При корректной работе (напуск при любом простое) в спектре обычного турбомолекулярного насоса углеводороды обнаружены не будут.



- |                           |               |
|---------------------------|---------------|
| 1. вакуумный порт         | 5. подшипник  |
| 2. высоковакуумный фланец | 6. двигатель  |
| 3. ротор                  | 7. вентилятор |
| 4. статор                 | 8. подшипник  |

*Рисунок 2.52.а. Поперечное сечение турбомолекулярного насоса HY.CONE*

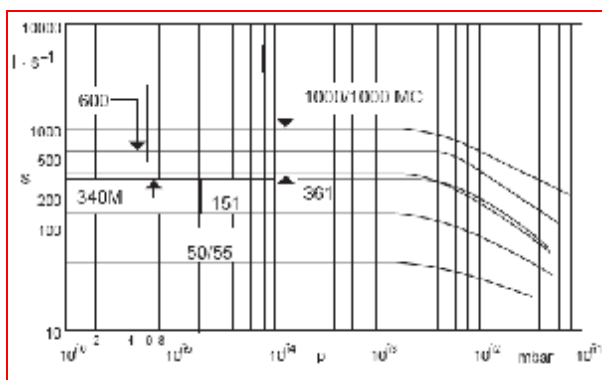


Рисунок 2.53. Быстрота действия по воздуху для различных турбомолекулярных насосов

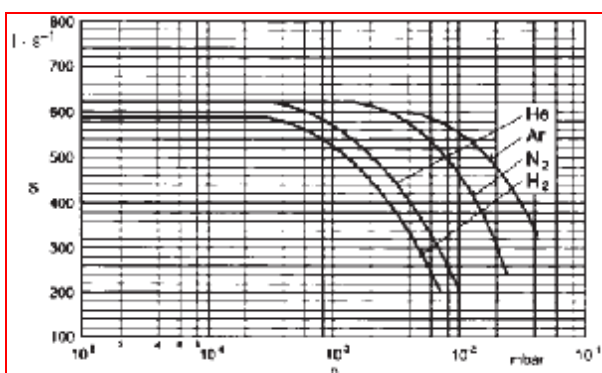


Рисунок 2.54. Зависимости быстроты действия насоса TURBOVAC 600 для различных газов

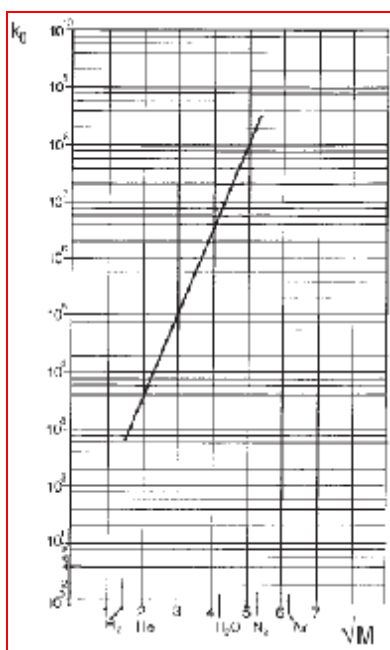


Рисунок 2.55. TURBOVAC450 – зависимость максимальной компрессии  $k_0$  от молярной массы  $M$

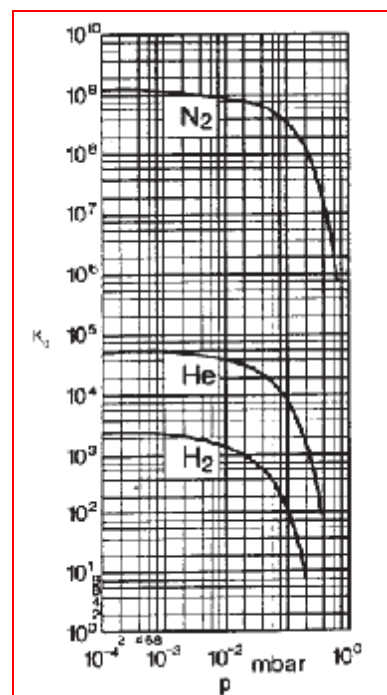
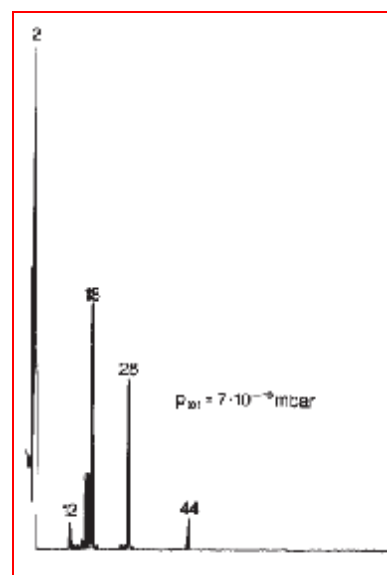


Рисунок 2.56. Зависимость компрессии  $k_0$  насоса TURBOVAC 340 для  $N_2$ , He,  $H_2$  от выпускного давления



$M$  = число массы = относительная молярная масса при ионизации 1

$I$  = ионный ток

Рисунок 2.57. Спектр газов над насосом TURBOVAC361

Дальнейшим развитием турбомолекулярных насосов являются гибридные турбомолекулярные насосы. На деле это два насоса в одном корпусе с общим валом. Высоковакуумная ступень для молекулярного режима течения – это классический турбомолекулярный насос, а второй насос для вязкостного режима течения – молекулярный или фрикционный насос.

LEYBOLD производит такие насосы как TURBOVAC 55 со встроенной ступенью Холвека (винто-

вой компрессор) и, например HY.CONE 200 с встроенной зигбановской ступенью (спиральный компрессор). Требуемое выпускное давление составляет несколько мбар, поэтому форвакуумный насос нужен только для сжатия 5...10 мбар до атмосферного давления. Сечение насоса HY.CONE представлено на рис. 2.52.а.

### Рекомендации по работе с турбомолекулярными насосами

#### Запуск

Как правило, турбомолекулярные насосы включаются вместе с форвакуумным насосом, чтобы снизить обратный поток масла от насоса в вакуумную камеру. Задержка запуска турбомолекулярного насоса существует для маленьких форвакуумных насосов и больших вакуумных камер. При известной скорости действия форвакуумного насоса  $S_V$  (м<sup>3</sup>/ч) и известном объеме вакуумной камеры (м<sup>3</sup>) можно определить давление включения турбомолекулярного насоса:

Одновременный запуск при

$$\frac{S_V}{V} > 40 \frac{1}{ч}$$

И задержка запуска при

$$\frac{S_V}{V} < 40 \frac{1}{ч}$$

При давлении включения

$$p_{V,Start} = e^{\left(\frac{S_V}{6V}\right)} \text{ мбар} \quad (2.24)$$

При откачке больших объемов давление запуска турбомолекулярных насосов можно определить с помощью графика на рис. 2.58.

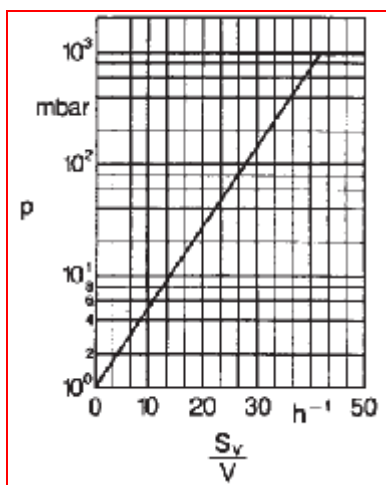


Рисунок 2.58. Определение давления включения турбомолекулярного насоса при откачке больших камер

#### Напуск

После выключения или в случае сбоя в подаче питания всегда следует проводить напуск турбомолекулярного насоса для предотвращения обратного потока углеводородов из форвакуума в вакуумную камеру. После выключения насоса следует так же выключать подачу охлаждающей воды, чтобы предотвратить возможную конденсацию паров воды. Чтобы защитить ротор рекомендуется соблюдать минимальное время напуска, указанное в руководстве по эксплуатации. Следует проводить напуск насоса (за исключением случаев работы с газами барьера/продувки) через фланец (порт) напуска, который уже оборудован спеченным металлическим дросселем, поэтому напуск можно проводить через обычный клапан или клапан напуска при отключении питания.

#### Работа с газом барьера

Если турбомолекулярный насос оборудован функцией работы с газом барьера (газом продувки), инертный газ, такой как азот, может подаваться через специальный фланец для защиты двигателя и подшипников от воздействия агрессивной среды. Специальный клапан (натекатель) отмеряет необходимое количество газа и может работать как клапан напуска.

#### Устранение вибраций

Насосы TURBOVAC точно сбалансированы и могут подсоединяться прямо к системе. Только для высокочувствительных приборов (таких как электронные микроскопы) рекомендуется устанавливать виброизоляторы, которые снижают существующие вибрации до минимума. Насосы с магнитным подвесом обычно напрямую подсоединяют к системе, т.к. они создают очень низкие вибрации.

Для **особых областей применения**, таких как работа в сильных магнитных полях, областях с повышенной радиацией или среде трития, обращайтесь в Отдел Продаж, специалисты которого имеют необходимый опыт.

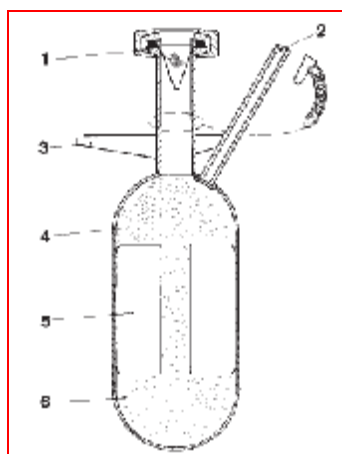
## 2.1.8 Сорбционные насосы

Термин «Сорбционные насосы» объединяет весь диапазон средств для удаления газов и паров из объема путем сорбции (поглощения). Частицы откачиваемого газа связываются на поверхности или проникают внутрь этих агентов за счет сил физической адсорбции, зависящей от температуры (силы Ван дер Вальса), хемосорбции, адсорбции или внедрения во время непрерывного образования новой сорбирующей поверхности. При сравнении принципов действия можно выделить **адсорбционные насосы**, в которых поглощение газов происходит за счет процессов адсорбции при температурном управлении, и **гет-**

**терные насосы**, в которых поглощение и удержание газов в основном происходит за счет образования химических соединений. Газопоглощение происходит на чистых, в основном металлических поверхностях, которые не покрыты оксидными и карбидными слоями. Такие поверхности всегда формируются во время производства, установки или при напуске системы. Большинство металлических поверхностей геттеров высокой чистоты непрерывно создаются прямо в вакууме за счет испарения (**испарительный ионно-сорбционный насос**) или за счет распыления (геттерный насос) или пассивацией слоя поверхности геттера (металла) при удалении за счет дегазации в вакууме, т.к. чистые металлы подвергаются воздействию в вакууме. Это называется активацией (**NEG насосы** – насосы с не распыляемым геттером).

### 2.1.8.1 Адсорбционные насосы

Адсорбционные насосы (рис. 2.59) работают согласно принципу физической адсорбции газов на поверхности молекулярного сита или других



- |                   |                            |
|-------------------|----------------------------|
| 1. входной порт   | 5. термопроводные пластины |
| 2. порт дегазации | 6. адсорбент (цеолит)      |
| 3. суппорт        |                            |
| 4. корпус насоса  |                            |

Рисунок 2.59. Сечение адсорбционного насоса

адсорбентов (активированного  $Al_2O_3$ ). В качестве адсорбента часто используется цеолит 13X. Этот щелочной алюмосиликат обладает для массы материала очень большой площадью поверхности,  $1000 \text{ м}^2/\text{г}$  твердого вещества. Рассмотрим его способность поглощать газы.

Диаметр пор цеолита 13X примерно 13Å что соизмеримо с размером молекул пара воды, масла и больших молекул газа (примерно 10Å). Считается что диаметр молекулы составляет примерно половину этого значения,  $5 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ , на поверхности  $1 \text{ м}^2$  адсорбируется монослой из  $5 \cdot 10^{18}$  молекул. Для молекул азота массой  $M=28$  это соответствует примерно  $2 \cdot 10^{-4} \text{ г}$  или 0,20 мбарл (раздел 1.1).

Поэтому поверхность площадью  $1000 \text{ м}^2$  может адсорбировать мономолекулярный слой, в котором будет более 133 мбарл газа.

Водород и легкие инертные газы (неон, гелий) имеют маленький диаметр молекул для цеолита 13X с диаметром пор 13Å. Поэтому эти газы очень плохо адсорбируются.

Адсорбция газов на поверхности зависит не только от температуры, но и от давления над адсорбирующей поверхностью. Зависимость от давления представлена на рис. 2.60 для некоторых газов с помощью изотерм адсорбции. На практике адсорбционные насосы подсоединяются к откачиваемой камере через клапан. Корпус насоса погружается в жидкий азот, что делает эффект поглощения технически полезным. Из-за различных адсорбционных свойств предельное давление и быстрота действия такого насоса различны для разных газов: наилучшие значения получаются для азота, углекислого газа, паров воды и масла. Легкие благородные газы почти не откачиваются, т.к. размер их молекул мал для пор цеолита. Т.к. эффект поглощения понижается в связи с увеличением покрытия поверхности цеолита, быстрота действия насоса падает с увеличением числа адсорбированных частиц. Таким образом, быстрота действия адсорбционного насоса зависит от количества уже адсорбированного газа и не постоянна во времени.

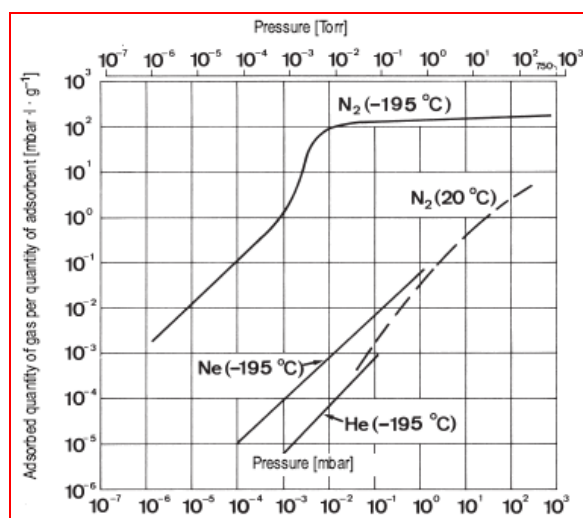


Рисунок 2.60. Изотермы адсорбции цеолита 13X

Предельное давление адсорбционного насоса определяется газами, которые преобладают в камере в начале откачки и плохо или совсем не адсорбируются (неон, гелий) на поверхности цеолита. В атмосферном воздухе эти газы присутствуют в очень небольшом количестве, поэтому можно получить давление  $< 10^{-2}$  мбар.

Если с помощью адсорбционного насоса нужно получить давление ниже  $10^{-3}$  мбар, то неон и гелий не должны присутствовать в смеси газов.

После откачки насос необходимо прогреть только при комнатной температуре, чтобы адсорбированные газы вышли, и адсорбент регенерировался. Если воздух (сырой газ) содержал много паров воды, рекомендуется прогреть насос в течение нескольких часов при 200°C и выше, чтобы высушить его.

Для откачки больших объемов используют несколько адсорбционных насосов, установленных параллельно или последовательно. Сначала давление понижается от атмосферного до нескольких мбар с помощью первой ступени, чтобы удалить большинство молекул гелия и неона. После насыщения насоса этой ступени, клапаны этого насоса закрываются, а клапан насоса с чистым адсорбентом открываются, чтобы насос мог откачивать камеру до следующего уровня низкого давления. Эти действия можно выполнять до тех пор, пока предельное давление не будет улучшено следующим чистым насосом.

### 2.1.8.2 Сублимационные насосы

Сублимационные насосы являются сорбционными насосами, в которых геттерные материалы испаряются и осаждаются на холодной внутренней стенке в виде геттерной пленки. На поверхности такой геттерной пленки молекулы газа образуют стабильные соединения, имеющие неизмеримо низкое давление паров. Активная геттерная пленка обновляется при последующем испарении. Обычно в качестве геттера в сублимационных насосах используется титан. Титан испаряется из проволоки, сделанной из специального сплава с высоким содержанием титана, нагреваемым электрическим током. Хотя оптимальную емкость сорбции (около 1 атома азота на 1 атом титана) едва удается получить на практике, титановые сублимационные насосы имеют очень высокие скорости действия для активных газов, которые особенно при начале процесса или при случайном выходе большого количества газа нужно быстро откачать. Т.к. сублимационные насосы работают в качестве дополнительных насосов (бустеров) для магнитоэлектрических и турбомолекулярных, то их установка необходима (как бустер в пароструйных насосах - раздел 2.1.6.2).

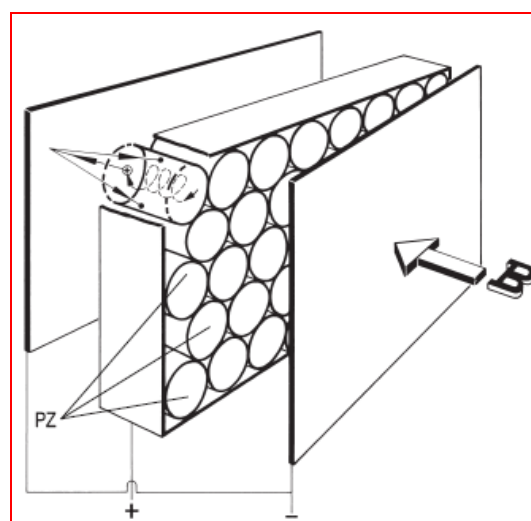
### 2.1.8.3 Магнитоэлектрические насосы

Принцип действия магнитоэлектрических насосов основан на сорбционных процессах, инициированных ионизированными частичками газа при разряде Пеннинга (разряде холодного катода). С помощью параллельных отдельных ячеек Пеннинга насос создает достаточно высокую скорость действия для отдельных газов.

#### Принцип работы

Ионы ударяются о катод системы разряда с холодным катодом и распыляют материал катода (титан). Титан осаждается в других местах и работает как пленка геттера и адсорбирует реактивные частички газа ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ). Энергии ионов газа не только достаточно для распыления материала катода, но и для проникновения сталкивающихся ионов глубоко в материал катода (ионная имплантация). Этот процесс сорбции позволяет откачивать ионы всех типов, включая ионы газов, которые не реагируют химически с распыляемым титаном (большинство инертных газов)

При образовании ионов используются компоненты: цилиндрические аноды из нержавеющей стали, расположенные рядом с параллельными катодами, перпендикулярными оси анодов (рис. 2.61). Катоды имеют отрицательный потенциал (несколько кВ) относительно анодов. Система электродов обеспечивает жесткое однородное магнитное поле с магнитной индукцией  $B = 0,1 \text{ Т}$  ( $T = \text{Тесла} = 10^4 \text{ Гаусс}$ ), создаваемое постоянными магнитами, установленными с внешней стороны корпуса насоса. Газовый разряд, создаваемый высоким напряжением, содержит электроны и ионы.



- ← ⊕ направление движения ионизированных молекул газа
- → направление движения распыляемого титана
- - - спирали движения электронов
- PZ – ячейки Пеннинга

Рисунок 2.61. Принцип работы магнитоэлектрического насоса

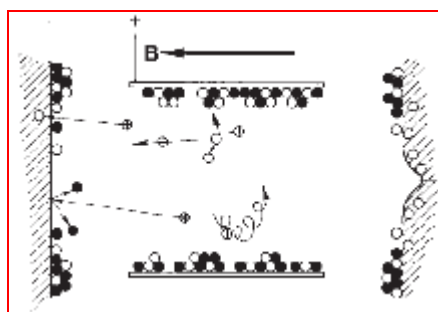
Под влиянием магнитного поля электроны двигаются по длинной спирали (рис. 2.61), пока они не попадут в цилиндр анода соответствующей ячейки. Длинный путь увеличивает выход ионов, даже при низкой плотности газа (давлении), что достаточно для поддержания газового разряда. Подача электронов от горячего катода не требуется. Т.к. их массы велики, движения ионов не подвергается влиянию магнитного поля данного значения. Они текут коротким путем и бомбят катод.

Ток разряда  $i$  пропорционален плотности нейтральных частиц  $n_0$ , плотности электронов  $n^-$  и длине пути разряда  $l$ :

$$i = n_0 \cdot n^- \cdot \sigma \cdot l \quad (2.25)$$

Эффективное сечение  $s$  для ионизации столкновения зависит от типа газа. Согласно (2.25) ток разряда  $i$  является функцией количества частиц  $n_0$ , как в датчике Пеннинга, следовательно он может использоваться для измерения давления в диапазоне  $10^{-4} \dots 10^{-8}$  мбар. При низких давлениях измерения не проводятся из-за влияния внешних полей.

Конфигурация системы электродов **магниторазрядного насоса диодного типа** показана на рис. 2.62. Пленка геттера формируется вдоль поверхности анода и между областью распыления, противоположной катоду. Ионы погружаются в поверхность катода. Т.к. поверхность катода распыляется, то частицы, погруженные в нее, снова становятся свободными. Поэтому, откачка инертных газов, которые могут откачиваться только с помощью погружения ионов будет исчезать через некоторое время и появится эффект запоминания.

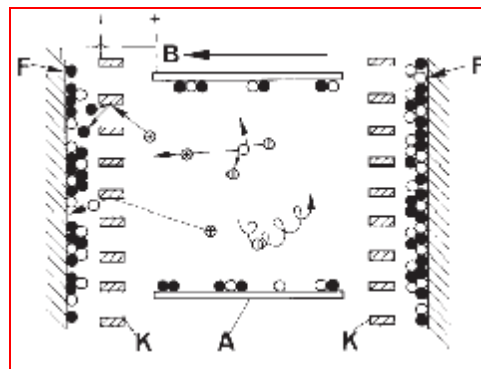


- атомы титана,
- молекулы газа
- ⊕ ионы,
- ⊖ электроны,
- В – магнитное поле

Рисунок 2.62. Конфигурация электродов в диодном насосе

В отличие от диодных насосов **триодные магниторазрядные насосы** обеспечивают высокую стабильность скорости откачки инертных газов, т.к. поверхности распыления и формирования пленки разделены. На рис. 2.63 показана конфигурация триодного магниторазрядного насоса. Его высокая эффективность при откачке инертных газов объясняется следующим образом: геометрия системы благоприятствует рассеиванию ионов под острым углом на титановых прутьях решетки катода, и таким образом скорость распыления значительно возрастает по сравнению с перпендикулярным соударением. Распыленный титан движется в том же направ-

лении, что и ионы. Пленки геттера образуются на третьем периферическом электроде, мишени, которой является стенка корпуса насоса. При этом повышается выход ионизированных частиц, которые скользят по сетке катода, где они нейтрализуются и от которой отражаются при перемещении к мишени при воздействии энергии, которая значительно больше тепловой энергии частиц газа  $\frac{1}{2} kT$ . Электрически нейтральные частицы могут проникать внутрь поверхностного слоя мишени, а эффект их распыления незначителен. Эти имплантированные частицы в итоге покрываются новым титановым слоем. Т.к. мишень имеет положительный потенциал, все положительные ионы, присутствующие здесь, отбрасываются и не могут влиять на слои мишени. Таким образом, имплантированные атомы инертных газов не могут высвободиться. **Быстрота действия триодного насоса для инертных газов не снижается во время работы насоса.**



- атомы титана,
- молекулы газа
- ⊕ ионы,
- ⊖ электроны,
- А – цилиндр анода (такой же как в диоде),
- В – магнитное поле,
- Ф – мишень (корпус насоса) как третий электрод,
- К – сетка катода

Рисунок 2.63. Конфигурация электродов в триодном насосе

Быстрота действия магниторазрядных насосов зависит от давления и рода газа. Оно измеряется в соответствии с методами, указанными в стандартах DIN 28 429 и PNEUROP 5615. Кривая скорости откачки  $S(p)$  имеет максимум. Номинальная быстрота действия  $S_n$  соответствует максимуму этой кривой по воздуху, при этом должно быть указано соответствующее давление.

Для воздуха, азота, углекислого газа и паров воды быстрота действия почти одинакова. При сравнении по скорости действия по воздуху скорости действия для других газов приблизительно такие:

Водород	150...200 %
Метан	100 %
Другие легкие углеводороды	80...120 %
Кислород	80 %
Аргон	30 %
Гелий	28 %

Триодные магниторазрядные насосы превосходят диодные по стабильности быстроты откачки для легких инертных газов. Аргон стабильно откачивается даже при входном давлении порядка  $1 \cdot 10^{-5}$  мбар. Насос может без проблем включаться при давлении выше  $1 \cdot 10^{-2}$  мбар и непрерывно работать при напуске воздуха с постоянным давлением  $5 \cdot 10^{-5}$  мбар. Новая конструкция электродов увеличивает ресурс катодов на 50%.

#### Влияние на технологический процесс в вакуумной камере магнитного поля и выход ионов из магниторазрядного насоса

Сильное магнитное поле, необходимое для работы неизбежно приводит к образованию магнитного поля рассеяния рядом с магнитами. В результате в некоторых случаях процессы в вакуумной камере могут прерываться, поэтому магниторазрядные насосы следует экранировать. Форма и тип экрана может рассматриваться с точки зрения оптимизации процесса в вакуумной камере, если он подвергается влиянию магнитного поля сильнее постоянно присутствующего магнитного поля Земли.

На рис. 2.64 представлено магнитное поле рассеяния на уровне входного фланца магниторазрядного насоса IZ270 и через 150 мм (параллельное сечение). Чтобы предотвратить выход ионов из области разряда и попадание в вакуумную камеру, следует установить подходящий экран из металлической сетки с противоположным потенциалом на входе насоса (ионный барьер). Однако это снижает быстроту действия насоса в зависимости от размера сетки.

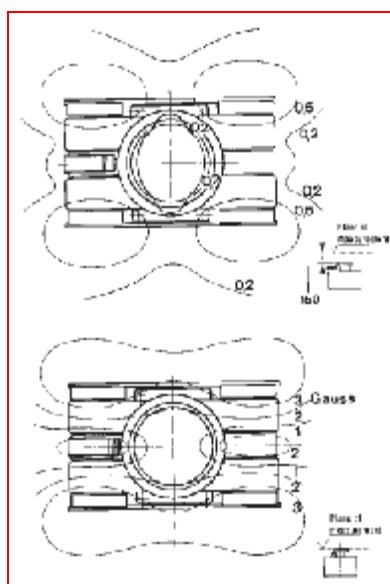


Рисунок 2.64. Магнитное поле рассеивания магниторазрядного насоса на входе в насос и через 150 мм (кривые - линии магнитной индукции  $B$ , измеренной в Гауссах ( $1 \text{ Гаусс} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Т} - \text{Тесла}$ ))

#### 2.1.8.4 Геттерные насосы (NEG насосы)

Геттерные насосы работают с нераспыляемыми, компактными геттерными материалами, поверхности которых имеют поры атомного уровня, так что они могут поглощать большое количество газа. Молекулы газа, адсорбированные на поверхности геттера, быстро диффундируют внутрь материала, поэтому на поверхности возможно поглощение других молекул. Насосы с нераспыляемыми геттерами содержат нагревательные материалы, которые используются для нагрева геттеров до оптимальной температуры в зависимости от рода откачиваемого газа. При более высокой температуре Геттерные материалы, которые уже насыщены газом, начнут регенерироваться (активируются). Геттерные материалы, в основном цинк-алюминиевые сплавы, используются в виде полосок. Особенности NEG насосов являются:

- постоянная скорость откачки в высоком и сверхвысоком вакууме,
- допустимое давление до 12 мбар,
- достигается очень высокая быстрота откачки для водорода и его изотопов,
- после активации насос может работать при комнатной температуре без необходимости использования электрической энергии,
- нет магнитных полей,
- безмасляный вакуум,
- отсутствие вибраций,
- низкий вес.

NEG насосы в основном используются вместе с другими высоковакуумными насосами (турбомолекулярным и криогенным). Такая комбинация особенно эффективна при необходимости понизить предельное давление в сверхвысоковакуумных системах, т.к. в основном водород влияет на предельное давление в сверхвысоковакуумных системах, а его NEG насосы хорошо откачивают. Типовым использованием NEG насосов является их использование в ускорителях частиц и подобных исследовательских системах, приборах для анализа поверхности, вторично-электронных умножителях и системах распыления. NEG насосы выпускаются с быстротой действия от нескольких л/с до 1000 л/с. Изготовленные по заказу такие насосы могут откачивать водород на несколько порядков выше.

#### 2.1.9 Крионасосы

Как Вы могли наблюдать, вода конденсируется на сосуде с холодной водой или окне, образует лед в Вашем холодильнике. Этот эффект конденсации газов и паров на холодной поверхности, особенно паров воды, происходит при атмосферном давлении и особенно в вакууме.



Этот эффект используется в конденсаторах (2.1.5) особенно в соединениях с химическими процессами, экраны диффузионных насосов используются с охлаждением с помощью рефрижераторов. Так же в замкнутом пространстве (вакуумной камере) образование конденсата на холодной поверхности означает, что большое количество молекул газа удаляется из объема: они остаются на холодной поверхности, а не в оставшейся атмосфере вакуумной камеры. Можно сказать, что частицы откачаны с помощью крионасоса, когда откачка достигается за счет холодной поверхности.

Криотехнику отделяют от холодильной техники, т.к. температура, используемая в криотехнике ниже 120K (< -153°C). Необходимо выяснить два вопроса:

- какой принцип охлаждения работает в криотехнике (крионасосе) и как снижать тепловую нагрузку на охлажденную поверхность?
- каков принцип работы крионасоса?

### 2.1.9.1 Типы крионасосов

В зависимости от принципа охлаждения выделяют:

- \* ванны криостата
- \* крионасосы непрерывного потока
- \* рефрижераторные крионасосы

В случае **ванны криостата** – самым простым примером которой является заливная азотная ловушка LN<sub>2</sub> - откачивающая поверхность напрямую охлаждается сжиженным газом. На поверхности охлажденной ловушки (T≈77 K), могут конденсироваться H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>. На поверхности охлажденной до T≈10 K могут конденсироваться почти все газы, за исключением He и Ne. Поверхности, охлаждаемые жидким гелием (T ≈ 4,2K), могут откачивать все газы кроме гелия.

В **крионасосах непрерывного потока** охлаждаемая поверхность спроектирована для работы в качестве теплообменника. Жидкий гелий в достаточном количестве подается дополнительным насосом из резервуара в испаритель чтобы поддерживать достаточно низкую температуру на охлаждаемой поверхности - криопанели. Жидкий гелий испаряется в теплообменнике и таким образом охлаждает криопанель. Отработанный газ, который создается (He) используется во втором теплообменнике для охлаждения экрана (теплоизоляции), защищающего систему от внешнего теплового излучения. Холодный выхлопной гелий, подаваемый насосом, подается в блок восстановления гелия. Температурой криопанели

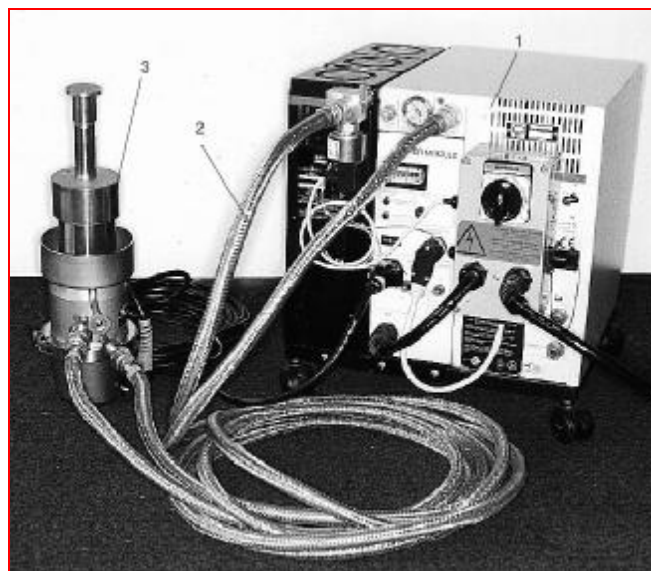
можно управлять через управление потоком гелия.

Сегодня **рефрижераторные крионасосы** используются почти везде (холод по заказу). Эти насосы в основном работают по тому же принципу, что и домашние холодильники, когда используется один из следующих термодинамических циклов с гелием в качестве хладагента:

- \* процесс Гиффорда – Мак-Махона,
- \* процесс Стерлинга,
- \* процесс Брайтона,
- \* процесс Клода.

Процесс Гиффорда – Мак-Махона сегодня наиболее широко используется и будет рассматриваться далее. Он дает возможность отдельной установки большого компрессора и блока расширения, в котором происходит процесс охлаждения. Поэтому можно спроектировать компактный источник холода без вибрации. Семейство крионасосов, выпускаемое LEYBOLD работает с двухступенчатыми охлаждающими головками соответствующими этому процессу, который подробно описан ниже.

Общий вид крионасоса показан на рис. 2.65. Он состоит из компрессора 1, соединенного с помощью гибких трубопроводов давления 2 (что обеспечивает отсутствие вибраций) с крионасосом 3. Сам крионасос состоит из корпуса насоса и охлаждающей головки внутри. Гелий, который используется в качестве хладагента, циркулирует по замкнутому контуру с помощью компрессора.



1. компрессор
2. гибкие трубопроводы
3. охлаждающая головка (без поверхности конденсации)

Рисунок 2.65. Компоненты крионасоса

### 2.1.9.2 Принцип работы охлаждающей головки

В охлаждающей головке цилиндр разделен на два рабочих пространства  $V_1$  и  $V_2$  с помощью разделителя. Во время работы правое пространство  $V_1$  нагревается и оставляет пространство  $V_2$  холодным. Для разделителя с частотой  $f$  мощность рефрижератора  $W$  будет:

$$W = (V_{2,\max} - V_{2,\min}) \cdot (p_H - p_N) \cdot f \quad (2.26)$$

Разделитель пневматически перемещается вперед, поэтому газ сжимается разделителем и перемещается в регенератор внутри разделителя. Регенератор является аккумулятором тепла с большой поверхностью для теплообмена и производительностью, работающий как теплообменник в цикле. На рис. 2.66 показаны 4 фазы охлаждения в одноступенчатом рефрижераторе охлаждающей головки согласно принципу Гиффорда – Мак-Махона.

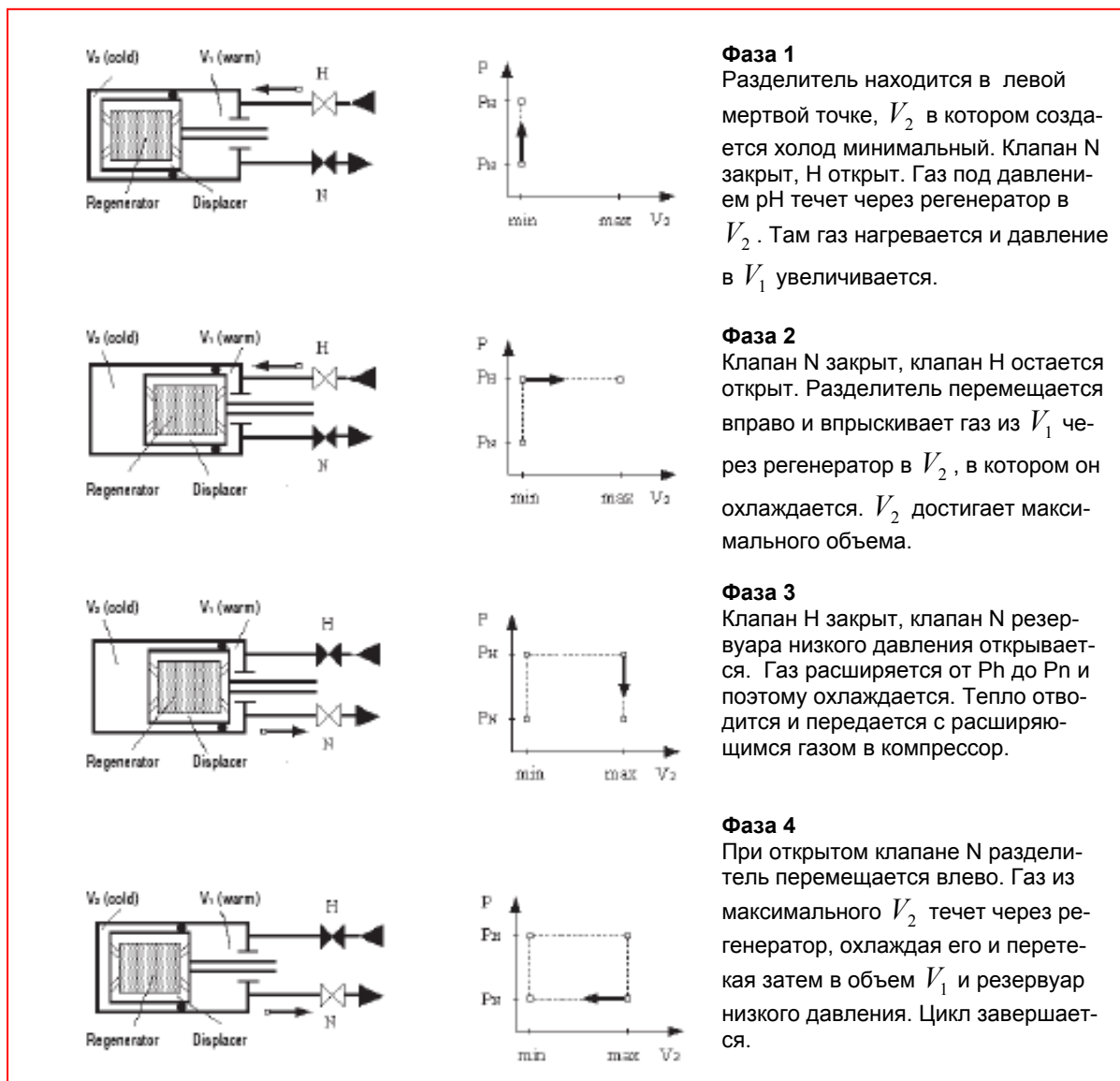


Рисунок 2.66. Фазы охлаждения в одноступенчатой охлаждающей головке по принципу Гиффорда – Мак-Махона

### Двухступенчатая охлаждающая головка

Рефрижераторы крионасосов производства LEYBOLD используют двухступенчатую охлаждающую головку, работающую согласно принципу Гиффорда – Мак-Махона (см. рис. 2.67). В двух последовательно соединенных ступенях темпе-

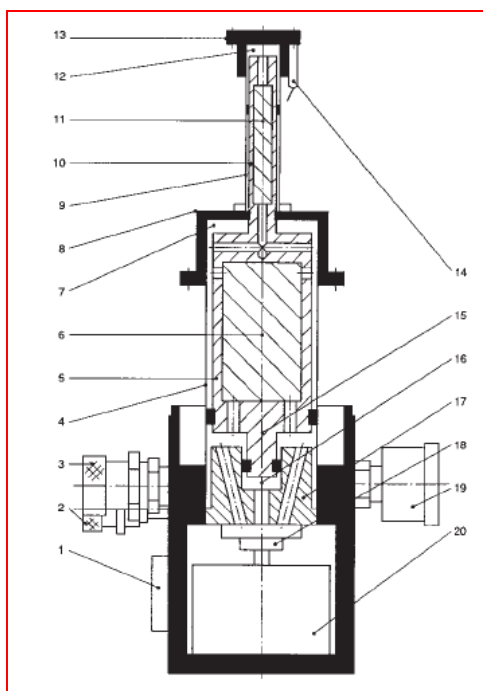
ратура гелия понижается примерно до 30 К на первой ступени и до 10 К на второй. Достижение низкой температуры зависит от многих параметров в типе регенератора. Обычно медь используется на первой ступени и второй ступени. Другие материалы используются как регенераторы

для специальных областей применения как криостаты для предельно низких температур ( $T < 10\text{K}$ ). Конструкция двухступенчатой охлаждающей головки показана схематически на рис. 2.67. С помощью механизма управления с двигателем, приводимым в движение клапаном управления 18, с диском управления 17 и отверстиями управления, начальное давление в объеме управления 16 изменяется, что приводит к перемещению разделителя первой и второй ступеней 11. Сразу после этого давление в объеме цилиндра выравнивается с помощью механизма управления. Охлаждающая головка соединяется с компрессором гибкими трубопроводами.

### 2.1.9.3 Рефрижератор крионасоса

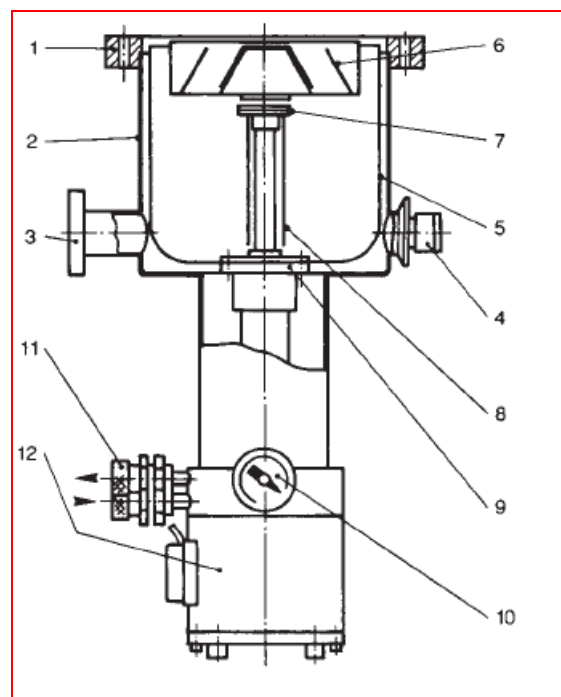
На рис. 2.68. показана конструкция крионасоса, охлаждающегося двухступенчатой охлаждающей головкой. Теплозащитный экран 5 с экраном 6 близко расположены к первой ступени 9 охлаждающей головки. При давлении ниже  $10^{-3}$  мбар тепловая нагрузка в основном создается тепловым излучением. По этой причине вторая ступень 7 с панелями конденсации и криосорбции 8

окружена теплозащитным экраном 5, черным внутри и отполированным снаружи. В условиях отсутствия тепловой нагрузки экран и теплозащитный экран (первой ступени) поддерживают температуру в диапазоне  $50 \dots 80\text{K}$ , а на криопанелях второй ступени – около  $10\text{K}$ . Температура поверхности криопанелей имеет решающее значение для процесса откачки. Температура поверхности зависит от мощности охлаждения, подаваемой охлаждающей головкой и свойствами теплопроводности в направлении корпуса насоса. Во время работы создаваемая газом нагрузка и тепло конденсации приводят к дальнейшему нагреву криопанелей. Температура поверхностей не только зависит от температуры криопанелей, но и от температуры газа, который уже намерз на криопанели. Криопанели 8, установленные на второй ступени 7 охлаждающей головки покрыты изнутри активированным углем, чтобы откачивать газы, которые не просто конденсировать и которые можно откачать только с помощью криопанелей (раздел 2.1.9.4).



- |   |   |
|---|---|
| 1. электрические соединения и электрические вводы для двигателя в охлаждающей головке | 11. регенератор 2 ступени                         |
| 2. соединение Не высокого давления  | 12. объем расширения 2й ступени                   |
| 3. соединение Не низкого давления   | 13. 2-ая ступень охлаждения (медный фланец)       |
| 4. цилиндр 1 ступени  | 14. камера измерения давления паров               |
| 5. разделитель 1 ступени  | 15. управляющий поршень                           |
| 6. регенератор 1 ступени  | 16. объем управления                              |
| 7. объем расширения 1 ступени   | 17. диск управления                               |
| 8. 1-ая ступень охлаждения (медный фланец)  | 18. клапан управления                             |
| 9. цилиндр 2 ступени  | 19. датчик для давления паров водорода /термометр |
| 10. разделитель 2 ступени   | 20. двигатель в охлаждающей головке               |

Рисунок 2.67. Двухступенчатая охлаждающая головка



- |   |   |
|---|---|
| 1. высоковакуумный фланец                                     | 9. 1-ая ступень охлаждающей головки ( $\approx 50 \dots 80\text{K}$ ).    |
| 2. корпус насоса  | 10. датчик давления паров водорода /термометр                             |
| 3. форвакуумный фланец  | 11. соединения подачи гелия (газа)  |
| 4. предохранительный клапан для выхода газа                   | 12. двигатель охлаждающей головки в корпусе с электрическими соединениями |
| 5. теплозащитный экран  |   |
| 6. экран  |   |
| 7. 2-ая ступень охлаждающей головки ( $\approx 10\text{K}$ ). |   |
| 8. криопанели   |   |

Рисунок 2.68. Конструкция крионасоса (схема)

#### 2.1.9.4 Осаждение газов на холодных поверхностях

Теплопроводность конденсированных (твердых) газов сильно зависит от их структуры и от того, как происходит конденсация. Различия в теплопроводности могут достигать нескольких порядков! Т.к. при конденсации увеличивается толщина, то тепловое сопротивление и, таким образом, температура поверхности возрастают, снижая быстроту действия насоса. Максимальная быстрота действия обновленного/ регенерированного насоса указывается в качестве номинальной. Процесс осаждения различных газов в крионасосе протекает в три стадии: сначала смесь газов и паров попадает на экран, температура которого около 80К. Здесь конденсируется большая часть паров  $H_2O$  и  $CO_2$ . Оставшаяся часть покидает экран и осажается на внешнюю часть криопанели второй ступени, охлажденной примерно до 10К. Здесь конденсируются такие газы как  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $Ar$ . Остаются только  $He$ ,  $H_2$  и  $Ne$ . Эти газы не могут откачиваться с помощью криопанелей и после нескольких соударений с теплозащитным экраном осаждаются на покрытых адсорбентом панелях (криосорбционные панели) путем криосорбции. Для этих целей конденсирующиеся в крионасосе газы разделены на три группы в зависимости от температуры в крионасосе, при которой из парциальное давление падает ниже  $10^{-9}$  мбар:

1-ая группа:

$P_s < 10^{-9}$  мбар при  $T \approx 77$  К ( $LN_2$ ) –  $H_2O$ ,  $CO_2$ .

2-ая группа:

$P_s < 10^{-9}$  мбар при  $T \approx 20$  К –  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $Ar$ .

3-ая группа:

$P_s < 10^{-9}$  мбар при  $T < 4.2$  К –  $H_2$ ,  $He$ ,  $Ne$ .

Различия в механизмах осаждения следующие:

**Криоконденсация** – это физическое и обратимое осаждение молекул газа через силы Ван дер Ваальса на сильно охлажденных поверхностях такого же материала. Энергия осаждения равна энергии испарения твердого газа, осажденного на поверхность, и понижается при увеличении толщины конденсата и повышении давления пара. **Криосорбция** – это физическое и обратимое осаждение молекул газа через силы Ван дер Ваальса на сильно охлажденных поверхностях такого же материала. Энергия осаждения равняется теплоте адсорбции, которая больше теплоты испарения. При образовании монослоя следующие молекулы проникают в поверхность с теми же свойствами (сорбент) и процесс превращается в криоконденсацию. Более высокая энергия для криоконденсации предотвращает дальнейший рост слоя конденсата снижая тем самым возможность адсорбции газов. Рекомен-

дуется использование адсорбентов, таких как активированный уголь, силикогель, алюмогель и молекулярного сита, имеющих структуру пор с очень большой характерной площадью поверхности около  $10^6$  м<sup>2</sup>/кг. Под **криоуправлением** понимается присоединение газов с низкой точкой кипения, которые трудно откачивать (таких как водород) в матрицу газов, имеющих высокую температуру кипения и которые легко откачиваются (такие как  $Ar$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ). При одинаковой температуре смесь конденсации имеет давление насыщенного пара, которое на несколько порядков ниже, чем давление чистого конденсата газа с низкой температурой кипения.

#### 2.1.9.5 Быстрота действия и расположение криопанелей

Рассматривая расположение криопанелей в крионасосе, проводимость от вакуумного фланца до их поверхности, а так же последовательность откачки (уже с учетом конденсации на экране, что не все газы могут достигнуть 2-ой ступени) ситуация выглядит так, как показано на рис. 2.69.

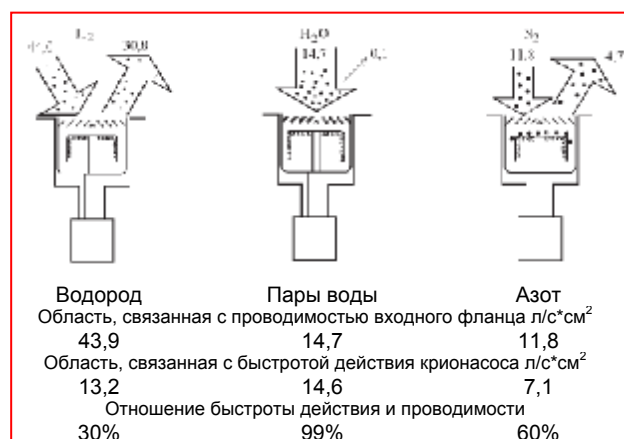


Рисунок 2.69. Криопанели - температура и размещение, определяющие эффективность насоса

Молекулы газа, попадающие в насос, создают область, связанную с теоретической быстротой действия согласно уравнению 2.29.а при температуре  $T=293$  К.

Различные быстроты действия смешиваются для трех представленных газов ( $H_2$ ,  $H_2O$  и  $N_2$ ), взятых из каждой описанной выше группы. Т.к. пары воды откачиваются на входе на область входа в насос, быстрота действия, измеренная для паров воды наиболее точно соответствует теоретической скорости действия, рассчитанной для входного фланца крионасоса. С другой стороны азот должен первым преодолеть экран перед тем,

как будет осажден на криопанель. В зависимости от конструкции экрана от него может отражаться 30...50% молекул азота.

$H_2$  попадает на криопанель после нескольких соударений и охлаждения газа. В случае оптимальной конструкции криопанелей и хорошего контакта с активированным углем можно осадить до 50%  $H_2$ , прошедшего экран. Из-за затруднений доступа к откачивающей поверхности и охлаждения газа в результате соударений со стенками внутри насоса до того, как газ достигнет откачивающей поверхности, измеренная быстрота действия для этих двух газов составляет лишь часть от теоретической быстроты действия. Часть, которая не откачивается, в основном отражается экраном. Более того, вероятность адсорбции для  $H_2$  различна для различных адсорбентов, и меньше 1, тогда как вероятность конденсации паров воды и азота примерно равна 1.

Три различные производительности насоса для откачиваемых газов являются результатом размера трех поверхностей (экрана, внешней поверхности конденсации второй ступени и сорбционной поверхности внутри второй ступени). При проектировании крионасоса состав газа (воздух) берется не таким, какой принят для всех вакуумных процессов (например процессов распыления, см. ниже 2.1.9.6).

### 2.1.9.6 Характеристики крионасоса

Характеристиками крионасоса являются (не по степени важности):

- время охлаждения
- сечение
- предельное давление
- емкость
- мощность охлаждения и мощность охлаждения сети
- время регенерации
- производительность и максимальный поток  $pV$
- быстрота действия
- ресурс/ продолжительность работы
- начальное давление (запуска)

**Время охлаждения** крионасоса – время от включения до проявления эффекта откачки. Для крионасосов с рефрижератором время охлаждения – это время, необходимое второй ступени для охлаждения от 293 К до 20 К.

**Характерное значение запуска** – характеристика уже охлажденного крионасоса. Это важно, когда крионасос подключен к вакуумной камере через высоковакуумный затвор. Это значение представляет собой максимальное количество газа относительно  $T_n=239K$ , которое может со-

держаться в вакуумной камере, так чтобы температура криопанели не повышалась выше 20K при подаче газа после открытия высоковакуумного затвора. Обычно указывается как значение  $pV$  (мбарл).

Значение запуска и объем камеры  $V$  влияют на давление запуска  $p_c$ , до которого должны быть откачаны вакуумная камера перед открытием клапана, установленного перед крионасосом. Можно руководствоваться следующей формулой:

$$p_c \leq \frac{35}{V} \cdot \mathcal{Q}_2(20K) \text{ мбар} \quad (2.27)$$

$V$  – объем камеры (л),  $\mathcal{Q}_2(20K)$  – емкость охлаждения (Вт) на второй ступени охлаждающей головки при 20K.

**Предельное давление  $p_{end}$ :**

Для криоконденсации может рассчитываться как

$$p_{end} = p_s(T_K) \cdot \sqrt{\frac{T_G}{T_K}} \quad (2.28)$$

где  $p_s$  – давление насыщенного пара откачиваемого газа (газов) при температуре криопанели  $T_K$ ,  $T_G$  – температура газа (температура стенок рядом с криопанелями).

**Пример:** с помощью кривой давления паров на рис. 9.15 для  $H_2$  и  $N_2$  предельные давления для  $T_G = 300 K$  приведены в табл. 2.6.

В таблице показано, что для  $H_2$  при температуре  $T < 3 K$  температуре газа  $T_G = 300 K$  (т.е. когда криопанель подвергается тепловому излучению от стенок) можно получить низкое предельное давление. В силу различных факторов, таких как десорбция стенок, наличие течей, теоретическое предельное давление получить на практике невозможно.

$T_K$ (К)	Предел. давление (по ур.2.28)	Предел. давление (мбар) $H_2$	Предел. давление (мбар) $N_2$
2.5	$10.95 p_s$	$3.28 \cdot 10^{-14}$	Очень мало
4.2	$8.66 p_s$	$4.33 \cdot 10^{-9}$	Очень мало
20	$3.87 p_s$	$3.87 \cdot 10^{-3}$	$3.87 \cdot 10^{-11}$

Таблица 2.6 Предельная температура при температуре стенок 300K

**Емкость  $C$**  (мбарл) крионасоса для некоторого количества материалов. Зависит от давления, со-



ответствует количеству газа (значение  $pV$  при  $T_n = 293 K$ ), которое может осесть в крионасосе до того, как быстрота действия крионасоса упадет ниже 50% от начального значения.

Емкость для газов, которые откачиваются по механизму криосорбции зависит от количества и свойств сорбционных материалов ниже по сравнению с независимой от давления емкости для газов, откачиваемых по методу криоконденсации.

**Мощность охлаждения**  $\dot{Q}$  (Вт) источника охлаждения при температуре  $T$  дает количество тепла, которое можно удалить путем охлаждения источника во время поддержания его температуры. Для рефрижераторов она согласовывается для установки на одноступенчатой охлаждающей головке температуры 80K и на двухступенчатой охлаждающей головке температуры 80K на первой ступени и 20 K на второй ступени при одновременной тепловой нагрузке на ступени. Во время измерения мощности охлаждения тепловая нагрузка создается электрическими нагревателями. Максимальная мощность охлаждения при комнатной температуре, и минимальная (нуль) при предельной температуре.

**Мощность охлаждения сети**  $\dot{Q}$  (Вт): для крионасосов с рефрижераторами допустимая мощность охлаждения сети при обычных рабочих температурах ( $T_1 < 80 K$ ,  $T_2 < 20 K$ ) в основном определяет производительностью и характерным значением запуска. Эта мощность в зависимости от конфигурации крионасоса намного ниже, чем мощность охлаждения охлаждающей головки без насоса.

**Поток**  $pV$  – см. раздел. 1.1.

**Время регенерации:** как устройство, захватывающее (улавливающее) газ, крионасос должен проходить регенерацию после определенного периода работы. Регенерация включает удаление сконденсированных и адсорбированных газов из крионасоса путем нагрева. Регенерацию можно проводить полностью или частично и по-разному нагревать крионасос.

При **полной** регенерации различают следующие методы:

1. естественный нагрев - после выключение компрессора, крионасос сначала прогревается очень медленно путем теплопроводности, а затем с учетом высвобождаемых газов
2. метод продувки газом - крионасос прогревается за счет продувки теплым газом.
3. электрические нагреватели – криопанели нагреваются с помощью нагревателей на первой и второй ступенях. Высвобождающиеся газы выходят или через предохранительный клапан (как при

продувке) или через откачку форвакуумным насосом. В зависимости от размера крионасоса процесс регенерации может занять несколько часов.

**Частичная регенерация:** т.к. ограничение ресурса крионасоса в большинстве областей применения зависит от предела емкости для таких газов как азот, аргон и водород, откачиваемые на второй ступени, то чаще требуется регенерировать только эту ступень. Пары воды во время частичной регенерации осаждаются на экране. Для этого температура первой ступени должна поддерживаться около 140 K иначе парциальное давление паров воды будет повышаться, и молекулы воды могут загрязнить адсорбент второй ступени.

В 1992 LEYBOLD впервые выпустил крионасос с возможностью частичной регенерации. Этим процессом **быстрой регенерации** управляет микропроцессор и осуществляет частичную регенерацию крионасоса примерно за 40 минут вместо 6 часов, необходимых для полной регенерации по методу продувки газом. сравнением между двумя типовыми циклами для частичной и полной регенераций показаны на рис. 2.70. Показано время, которое экономится с системе с быстрой регенерацией. В целях защиты окружающей среды для типовых процессов осаждения рекомендуется проводить одну полную регенерацию после 24 часовых.

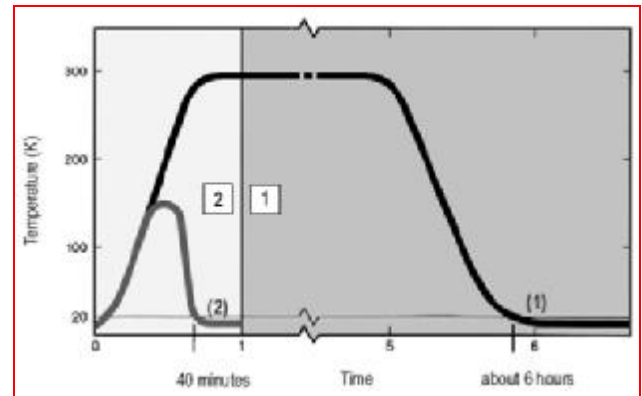


Рисунок 2.70. Сравнение между двумя типовыми циклами для полной (1) и частичной (2) регенераций

**Производительность и максимальный поток**  $pV$  (мбар·л/с): производительность крионасоса по некоторому газу зависит от потока  $pV$  газа  $G$  через входное отверстие насоса:

$$Q_G = q_{pV,G}; Q_G = p_G \cdot S_G$$

$p_G$  – входное давление,  $S_G$  – эффективность откачки для газа  $G$ .

Максимальный поток  $pV$ , при котором криопанель прогревается примерно до  $T \approx 20 K$  при **непрерывной работе** зависит от мощности ох-

лаждения сети насоса при этой температуре и рода газа. Для насосов с рефрижераторами и конденсируемых газов можно использовать уравнение:

$$Q_{\max} = 2.3 \mathcal{Q}_2(20K) \text{ мбар} \cdot \text{л} / \text{с}$$

$\mathcal{Q}_2(20K)$  – мощность охлаждения сети (Вт) на второй ступени охлаждающей головки при 20К. Для **периодической работы** допустим более высокий поток  $pV$  (см. характерное значение запуска).

**Быстрота действия**  $S_{th}$  теоретическая для крионасоса определяется как:

$$S_{th} = A_K \cdot S_A \cdot \alpha \cdot \left(1 - \frac{P_{end}}{p}\right) \quad (2.29)$$

$A_K$  – размер криопанели,  $S_A$  – площадь поверхности связанная со скоростью откачки (область осаждения согласно ур. 1.17 и 1.20, пропорциональная скорости молекул газа в направлении криопанели),  $\alpha$  – вероятность конденсации (осаждения),  $P_{end}$  – предельное давление,  $p$  – давление в вакуумной камере.

Уравнение 2.29 применимо к криопанели, установленной в вакуумной камере, поверхность которой гораздо меньше по сравнению с поверхностью камеры. При очень низкой температуре вероятность  $\alpha = 1$  для всех газов. Уравнение 2.29 показывает, что для  $p \gg P_{end}$  выражение в скобках близко к 1, поэтому в случае превышения насыщения:

$$p \gg P_{end} > P_s, \text{ откуда}$$

$$S_{th} = A_K \cdot S_A \quad (2.29.a)$$

$$S_A = \frac{\bar{C}}{4} = \sqrt{\frac{R \cdot T_G}{2 \cdot \pi \cdot M}} = 3.65 \sqrt{\frac{T_G}{M}} \frac{\text{л}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}$$

$T_G$  – температура газа (К),

$M$  – молярная масса.

В табл. 2.7 указана площадь поверхности, связанная с быстротой действия  $S_A$  (л/с·см<sup>2</sup>) для некоторых газов при различных температурах газа  $T_G$  (К), полученная по уравнению 2.29.a. Указанные в таблице значения являются предельными. На

практике большинство условий равновесия (маленькие криопанели по сравнению с большой поверхностью стенок) не очень достоверны, т.к. для достижения хорошего конечного вакуума и короткого времени откачки требуются большие криопанели. Отклонения являются результатом того, что криопанели окружены охлажденным экраном, на котором скорость проникающих молекул снижается за счет охлаждения.

**Ресурс/период работы**  $t_{op}$  (с) крионасоса для отдельного газа зависит от уравнения

$$C_G = \int_0^{t_{op,G}} Q_G(t) dt$$

где  $C_G$  – емкость крионасоса для газа  $G$ ,  $Q_G(t)$  – производительность крионасоса для газа в точке времени  $t$ .

Если известна постоянная во времени производительность  $\bar{Q}_G$ , используется уравнение:

$$t_{op,G} = \frac{C_G}{\bar{Q}_G} = \frac{C_G}{\bar{p}_G \cdot S_G} \quad (2.30)$$

После истечения периода работы  $t_{op,G}$  необходимо провести регенерацию крионасоса с учетом рода газа  $G$ .

**Давление запуска**  $p_0$ : вообще запуск крионасоса при атмосферном давлении возможен, но нежелателен по нескольким причинам. Пока длина свободного пути молекул газа меньше размеров вакуумной камеры ( $p > 10^{-3}$  мбар), теплопроводность газов столь высока, что на криопанель будет действовать недопустимо большое количество тепла. Далее, при запуске на криопанели будет образовываться толстый слой конденсата. Это будет сильно снижать емкость крионасоса, которая может быть в рабочей области. Газ (обычно воздух), будет проникать в адсорбент, т.к. энергия проникновения для этого ниже чем для конденсации на поверхности. Это приведет к снижению уже ограниченной емкости для водорода. Рекомендуется включать крионасос в области высокого и сверхвысокого вакуума с форвакуумным насосом при давлении  $p < 5 \cdot 10^{-2}$  мбар. При достижении давления запуска форвакуумный насос можно выключить.



Символ	газ	М молярная масса	$S_A$ при 293К темп. газа	$S_A$ при 80 К темп. газа	$T_S$ точка кипения 1013 мбар	Тройная точка (= точка плавления)	
			г/моль	л/с · см <sup>2</sup>	л/с · см <sup>2</sup>	К	$T_t, K$
H <sub>2</sub>	Водород	2.016	43.88	22.93	20.27	13.80	70.4
He	Гелий	4.003	31.14	16.27	4.222	2.173	50.52
CH <sub>4</sub>	Метан	4.003	15.56	8.13	111.67	90.67	116.7
H <sub>2</sub> O	Вода	18.015	14.68	–	373.15	273.16	6.09
Ne	Неон	20.183	13.87	7.25	27.102	24.559	433.0
CO	Моноксид углерода	28.000	11.77	6.15	81.67	68.09	153.7
N <sub>2</sub>	Азот	28.013	11.77	6.15	77.348	63.148	126.1
	Воздух	28.96	11.58	6.05	≈ 80.5	≈ 58.5	–
O <sub>2</sub>	Кислород	31.999	11.01	5.76	90.188	54.361	1.52
Ar	Аргон	39.948	9.86	5.15	87.26	83.82	687.5
Kr	Криптон	83.80	6.81	3.56	119.4	115.94	713.9
Xe	Ксенон	131.3	5.44	2.84	165.2	161.4	

Таблица 2.7 поверхность, определяющая быстроту действия для некоторых газов

## 2.2 Выбор процесса откачки

### 2.2.1 Обзор наиболее широко используемых процессов откачки

Вакуумная технология получила сильное развитие в 50<sup>-ых</sup> годах и является важной составляющей в научных исследованиях и большинстве отраслей промышленности.

В связи с использованием во многих областях количество технических процедур в вакуумных технологических процессах очень велико. Их нельзя описать в данном разделе, т.к. основной упор сделан на процесс откачки, а не на процесс, происходящий в камере. Обзор наиболее важных процессов и областей давления, в которых происходят эти процессы, схематично представлен на рис. 2.71 и 2.72.

В основном процесс откачки для этих технологических процессов можно разделить на две категории процессов – сухой и влажный, т.е. когда нет значительного количества откачиваемых паров, и когда количество паров увеличивается в процессе (в основном воды или органических). Различия между этими двумя категориями можно кратко описать так:

**Сухие процессы в основном работают в узком, ограниченном диапазоне давления.**

Системы обычно откачиваются до подходящего давления перед началом технологического процесса. Это происходит, например, в процессах нанесения покрытий, электронно-лучевой сварке, выращивании кристаллов; в ускорителях, масс-спектрометрах, электронных микроскопах и других приборах.

Так же существуют сухие процессы, в которых технологическим процессом является дегазация в вакууме. Они включают процессы в индукционных и дуговых печах, дегазацию стали, производство чистых металлов и электронных трубок.

**Влажные процессы в основном используются в заданных технологических процессах в широком диапазоне давлений.** Это особенно важно в процессах сушки твердых материалов. Если, например, работы проводятся в основном при низком давлении, внешние поверхности высушиваются очень быстро. В результате тепловой контакт с испаряемой влагой ослабнет, и время сушки значительно возрастет. К этим процессам в основном относятся подпитка под вакуумом и сублимационная сушка.

При удалении паров воды из жидкости или их дистилляции, в основном в колоннах дегазации, заполнении под вакуумом, герметизации, в молекулярной дистилляции, важно создание максимально возможных жидких поверхностей. **Во всех влажных процессах очень важно обеспечить необходимое тепло для испарения влаги.**

Основные процессы откачки приведены далее.

При наличии дополнительных вопросов обращайтесь в компанию LEYBOLD, имеющую многолетний опыт.

**Классификация типовых вакуумных процессов и технологических процессов в зависимости от давления:**

Форвакуум 1013...1 мбар

\* сушка, дистилляция и дегазация стали

Средний вакуум 1...10<sup>-3</sup> мбар

\* молекулярная дистилляция, сублимационная сушка, подпитка под вакуумом, плавка, обжиг

Высокий вакуум 10<sup>-3</sup>...10<sup>-7</sup> мбар





\* нанесение покрытий, выращивание кристаллов, масс-спектрометрия, производство кинескопов, электронные микроскопы, электронно-лучевые установки и ускорители частиц  
Сверхвысокий вакуум <math> < 10^{-7}</math> мбар

\* ядерный синтез, накопительные кольца ускорителей, исследования в области космоса и физики поверхности.

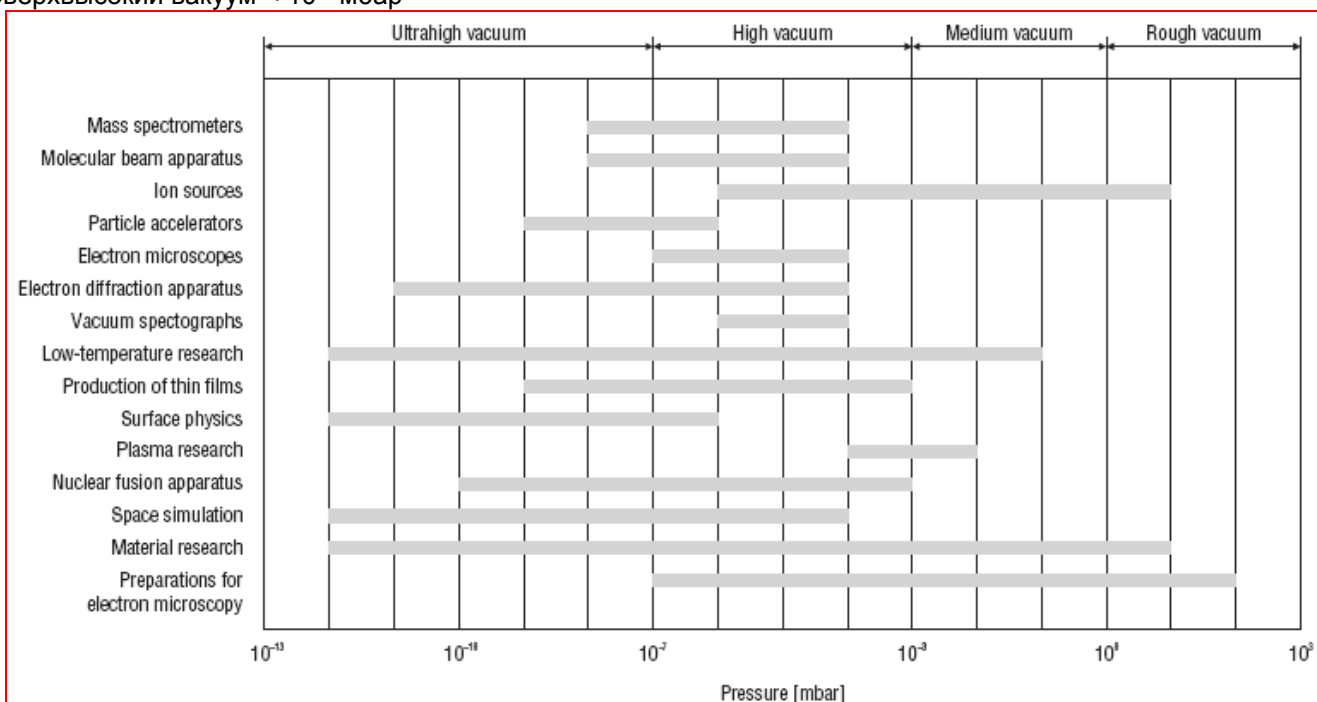


Рисунок 2.71. Диапазоны давления ( $p < 1000$  мбар) исследовательских процессов в области физики и химии

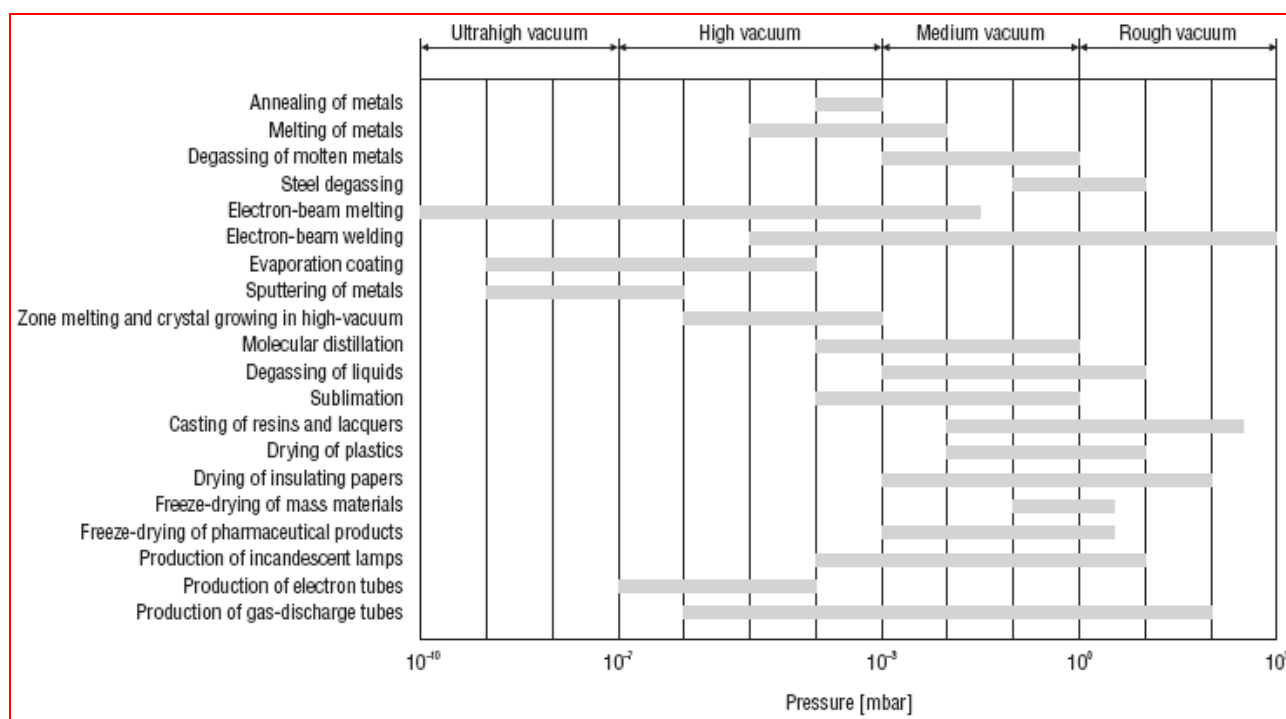


Рисунок 2.72. Диапазоны давления технологических вакуумных процессов

## 2.2.2 Откачка газов (сухие технологические процессы)

Для сухих процессов с откачкой неконденсирующихся газов и смесей (воздух) используемый насос характеризуется требуемым рабочим давлением и количеством откачиваемого газа. Этот раздел посвящен рабочему давлению (выбор насоса - в разделе 2.3)

Каждый из насосов характеризуется диапазоном рабочих давлений, в котором он работает наиболее эффективно. Поэтому наиболее подходящие насосы описаны по диапазонам давлений. Для любого сухого процесса сначала необходимо откачать камеру. Вполне возможно, что насосы, использующиеся для откачки камеры, будут другими, чем те, которые оптимально подобраны для процесса, выполняющегося при определенном рабочем давлении. В этом случае выбор следует делать с учетом диапазона рабочего давления основного технологического процесса.

### а) Форвакуум $10^{13} \dots 1$ мбар

Область рабочих давлений вращательных насосов лежит ниже 80 мбар. Потребление энергии (рис. 2.11) и масла (раздел 8.3.1.1) при более высоких давлениях для этих насосов очень высоко. Поэтому, если газы откачиваются при давлении выше 80 мбар в течение длительного периода, из экономических соображений следует использовать водокольцевые, струйные или сухие, многопластинчатые насосы. Пластинчато-роторные и поршневые насосы очень подходят для откачки камеры от атмосферного давления до давлений ниже 80 мбар, поэтому они могут непрерывно работать при низких давлениях. Если большое количество газа поднимает давление на входе выше 40 мбар, рекомендуется использовать соединенные последовательно насосы Рутса. Для обеспечения требуемой скорости действия предварительной откачки можно использовать меньший пластинчато-роторный или поршневой насос.

### б) Средний вакуум $1 \dots 10^{-3}$ мбар

Если вакуумная камера откачивается до давлений из области среднего вакуума, то необходимо обеспечить требуемое выпускное давление для диффузионного или магниторазрядного насоса, одно- или двухступенчатых вращательных насосов для откачки до  $10^{-1}$  и  $10^{-3}$  мбар соответственно. Выбрать подходящий насос значительно труднее, если во время процесса в области среднего вакуума газ или пар постоянно подается и его необходимо откачивать. Можно дать важное замечание. Рядом с достижимым предельным давлением быстрота действия всех вращательных насосов быстро падает. Поэтому нижним пределом для нормального диапазона рабочих давлений таких насосов следует брать

тот, при котором быстрота действия составит более 50% от номинальной рабочей скорости.

**В диапазоне давления  $1 \dots 10^{-2}$  мбар** при действии большого количества газа оптимальные свойства проявляют насосы Рутса с вращательными насосами в качестве форвакуумных насосов (раздел 2.1.3.1). Для этого диапазона давлений достаточно одноступенчатого вращательного насоса, если диапазон рабочих давлений лежит выше  $10^{-1}$  мбар. Если давления находятся в диапазоне  $10^{-1} \dots 10^{-2}$  мбар, рекомендуется использовать двухступенчатый насос для предварительного разряжения. Ниже  $10^{-2}$  мбар используют одноступенчатый насос Рутса в комбинации с двухступенчатым вращательным насосом в качестве форвакуумного. Однако в диапазоне  $10^{-2} \dots 10^{-4}$  мбар двухступенчатые насосы Рутса (или два одноступенчатых, соединенных последовательно) с двухступенчатыми вращательными насосами в качестве форвакуумных обеспечат высокую быстроту действия. Этот диапазон давлений является обычным рабочим диапазоном для парожетторных насосов. Они очень экономически выгодны для работы в этом диапазоне. В качестве форвакуумных насосов подходят одноступенчатые вращательные насосы объемного действия. Если предусматривается работа без клапанов или небольшое поддержание давления (т.е. маленькая камера при коротком рабочем цикле откачивается до  $10^{-4}$  мбар или большая камера поддерживается при этом давлении в течение недели), уже упомянутые двухступенчатые насосы Рутса с двухступенчатыми вращательными насосами в качестве форвакуумных будут подходящей комбинацией. Хотя такая комбинация насосов экономически не столь выгодна, как парожетторный насос, она может больше работать без технического обслуживания.

### с) Высокий вакуум $10^{-3} \dots 10^{-7}$ мбар

В области давлений ниже  $10^{-3}$  мбар обычно работают диффузионные, магниторазрядные, турбомолекулярные насосы. Если рабочее давление изменяется во время технологического процесса, к камере должны подключаться различные системы откачки. Существуют специальные диффузионные насосы, которые сочетают в себе типичные свойства диффузионных насосов (низкое предельное давление, высокая быстрота откачки в области высокого вакуума) с лучшими свойствами парожетторных насосов (высокая производительность в области среднего вакуума с высоким предельным выпускным давлением). В рабочем диапазоне  $10^{-2} \dots 10^{-6}$  мбар рекомендуется использовать диффузионные насосы.

### д) Сверхвысокий вакуум $< 10^{-7}$ мбар

Для создания сверхвысокого вакуума используются магниторазрядные, сублимационные, турбомолекулярные насосы и крионасосы в комбинации с подходящими форвакуумными насосами. Насосы, наиболее подходящие для работы в



сверхвысоком вакууме, зависят от различных условий (см. раздел 2.5)

### 2.2.3 Откачка газов и паров (влажные технологические процессы)

Когда необходимо откачивать пары, в дополнение к рабочему давлению и скорости действия третьим определяющим фактором становится парциальное давление паров, которое может значительно изменяться в ходе процесса. Этот фактор является определяющим при выборе устанавливаемого насоса. С этой точки зрения очень важные замечания относительно вращательных насосов даны в разделе 2.1.5. Они имеют очень высокую скорость действия при откачке паров. Далее описывается откачка паров воды (чаще используется). Эти же замечания применимы к подобным неагрессивным парам.

#### Откачка паров воды

Пары воды часто откачиваются насосами, которые работают со струей воды в качестве рабочей жидкости (водокольцевые или парозежкторные насосы). Это сильно зависит от условий, однако, в силу экономичности парозежкторных насосов при низком давлении они предпочтительнее вращательных. Для откачки паро-газовых смесей, в которых часть паров больше части воздуха, пар можно откачивать конденсаторами и с помощью небольших газобалластных насосов (раздел 2.1.5).

Набору из насоса Рутса, конденсатора и форвакуумного насоса, который может транспортировать 100 кг/ч паров и 18 кг/ч воздуха при входном давлении 50 мбар, требуется мощность 4...10 кВт в зависимости от количества воздуха. Парозежкторному насосу при тех же характеристиках требуется примерно 60 кВт, независимо от количества присутствующего воздуха.

Для откачки паров воды особенно рекомендуется использовать пароводяные, газобалластные насосы и комбинации насосов газобалластных и Рутса и конденсаторов.

#### Откачка паров воды насосами с газобалластом

Отношение парциального давления паров  $p_v$  и парциального давления воздуха  $p$  определяет корректный выбор газобалластного насоса, как показано ранее в уравнении 2.2 и 2.3. Поэтому, если известна допустимость паров воды газобалластного насоса, с помощью графиков можно оценить корректность использования газобалластного насоса для откачки паров воды (рис. 2.73). Большой одноступенчатый вращательный плунжерный насос имеет рабочую температуру 77°C и допустимость паров воды около 60 мбар. Это

значение используется для определения различных рабочих областей на рис. 2.73. Так же считается, что давление на выходном порту газобалластного насоса может повышаться максимум до 1330 мбар, до открытия выхлопного клапана.

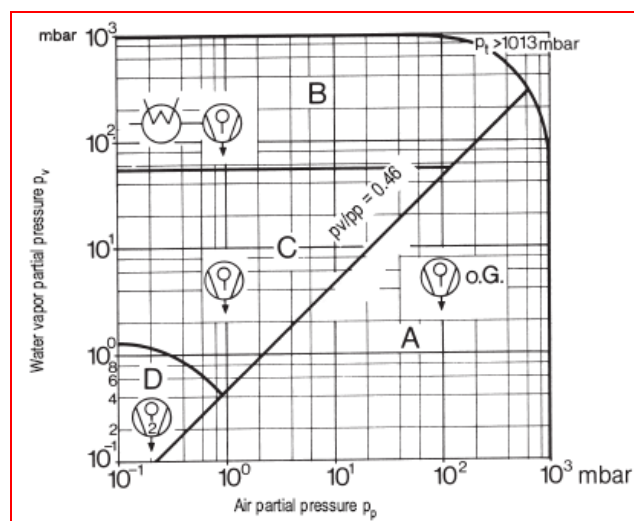


Рисунок 2.73. Области использования газобалластных насосов и конденсаторов для откачки паров воды (о.Г. = без газобалласта)

#### Область А: одноступенчатые плунжерные насосы без газобалластного входа.

При давлении насыщения  $p_s = 419$  мбар при 77°C согласно уравнению 2.2 необходимо, чтобы  $p_v < 0.46 \cdot p_p$ , где

$p_v$  – парциальное давление паров воды,

$p_p$  – парциальное давление воздуха,

$p_v + p_p = p_{tot}$  - общее давление.

Это требование справедливо на всем рабочем диапазоне одноступенчатого плунжерного насоса, общее давление в диапазоне  $10^{-1} \dots 1013$  мбар.

#### Область В: одноступенчатые плунжерные насосы с газобалластным и входным конденсатором.

В этой области входное давление паров превышает допустимое парциальное давление на входе. Поэтому, газобалластный насос должен быть оборудован конденсатором на входе, который устанавливается так, чтобы парциальное давление паров воды на входе в насос не превышало допустимое значение. Корректные размеры конденсатора выбираются в зависимости от количества присутствующих паров воды (раздел 2.1.5). При допустимости паров воды 60 мбар, предельное значение для этой области  $p_v > 60 + 0.46 p_p$  мбар.

### **Область С: одноступенчатые плунжерные насосы с газобалластом**

Нижний предел области С характеризуется нижним пределом рабочего диапазона насоса, поэтому  $p_{tot} = 1$  мбар. Если в этой области повышается количество паров, более выгодно использовать конденсатор (20 кг паров при 28 мбар действуют в объеме около  $1000\text{ м}^3$ ). Неразумно откачивать этот объем вращательным насосом. Как правило:

**Конденсатор следует всегда устанавливать, если давление насыщенного водяного пара на входе повышается на длительный период.**

В качестве мер предосторожности насос Рутса следует всегда устанавливать перед конденсатором при низких входных давлениях, так чтобы значительно усилить емкость конденсации. Емкость конденсации зависит не только от давления паров, но и от температуры хладагента. При низком давлении паров эффективную конденсацию можно получить только при очень низкой температуре хладагента. При давлении паров ниже 6,5 мбар конденсатор разумно использовать только при температуре хладагента ниже  $0^\circ\text{C}$ . Часто откачиваются смеси газа – пара при низком давлении (раздел 2.1.5). В общем, можно обойтись без конденсатора.

**Область D: двухступенчатый газобалластный насос, насос Рутса, парожетторный насос, всегда соответствующие общему давлению процесса.**

Необходимо заметить, что допустимость паров воды в двухступенчатых насосах ниже, чем в соответствующем одноступенчатом.

### **Откачка паров воды насосами Рутса**

Обычно невыгодно использовать насосы Рутса в качестве газобалластных насосов при непрерывной работе при давлении выше 40 мбар. Для больших наборов насосов, которые работают с характерными передаточными отношениями и обеспечивают байпасные трубопроводы, с характерным потреблением мощности более желательны. Для насоса Рутса, установленного для откачки паров в качестве газобалластного, можно построить график со всеми возможными случаями (рис. 2.74).

**Область А: насос Рутса с одноступенчатым плунжерным насосом без газобалласта.**

Т.к. существует компрессия между насосом Рутса и плунжерным насосом, здесь можно использовать следующее выражение:

$$p_V < 0.46 p_p$$

Это требование справедливо на всем рабочем диапазоне комбинации насосов, общее давление

в диапазоне  $10^{-2} \dots 40$  мбар (или 1013 мбар для насоса Рутса с байпасным трубопроводом).

**Область В: конденсатор, насос Рутса с байпасным трубопроводом, промежуточный конденсатор, газобалластный насос.**

Эта комбинация выгодна только при непрерывной откачке большого количества паров воды при входном давлении выше 40 мбар. Размер основного конденсатора зависит от количества присутствующих паров. Промежуточный конденсатор должен снижать парциальное давление паров воды ниже 60 мбар. Газобалластный насос должен быть достаточным для предотвращения превышения критического значения парциального давления воздуха за промежуточным конденсатором. Например, если общее давление за насосом Рутса (которое всегда эквивалентно общему давлению за промежуточным конденсатором) составляет 133 мбар, газобалластный насос должен откачивать парциальное давление воздуха до 73 мбар, (количество воздуха, передаваемое ему насосом Рутса). С другой стороны, он должен брать больше паров воды, чем допустимо. **Использование газобалластного насоса разумно только при откачке паров вместе с воздухом!**

Для идеальной герметичной камеры газобалластный насос следует изолировать после достижения требуемого рабочего давления и продолжать откачку только конденсатором (см. раздел 2.1.5, где описаны комбинации насосов и конденсаторов).

**Область С: насос Рутса, промежуточный конденсатор, газобалластный насос.**

Нижний предел парциального давления паров воды определяется через коэффициент компрессии насоса Рутса при выпускном давлении, которое определяется давлением насыщенного пара конденсированной воды. Так же в этой области промежуточный конденсатор должен снижать парциальное давление паров воды как минимум до 60 мбар. Эта комбинация подходит при охлаждении конденсатора водой, температура которой  $15^\circ\text{C}$ , для давления паров воды в диапазоне 4...40 мбар.

**Область D: насос Рутса и газобалластный насос**  
В этой области пределы так же сильно зависят от ступеней и размеров насосов. В основном эта комбинация может использоваться в диапазоне  $10^{-2} \dots 4$  мбар.

## **2.2.4 Процессы сушки**

Часто вакуумные процессы протекают в нескольких областях давления. При объемной сушке процесс может, например (рис. 2.74) протекать в области А (откачка пустой камеры), а затем пе-



реходить в области В, С и D. При таком течении процесса следует:

**А. Откачать камеру газобалластным насосом и насосом Рутса с байпасным трубопроводом.**

**В. Подключить два конденсатора, т.к. повышение паров воды создает нагрев материалов.**

Выбор системы откачки определяется наивысшим парциальным давлением паров воды и низшим парциальным давлением воздуха, которые могут наблюдаться на входе.

**С. Обойти главный конденсатор через байпасный трубопровод**

Теперь он не будет оказывать влияние. Это будет только лишний объем в системе откачки с дальнейшим падением давления паров.

**Д. Обойти промежуточный конденсатор через байпасный трубопровод**

Теперь насосы Рутса и газобалластные насосы могут сами откачивать. При кратковременной сушке отделение конденсаторов, наполненных сконденсированной водой особенно важно, т.к. газобалластный насос будет продолжать откачивать конденсатор с предварительно сконденсированными парами воды при давлении насыщенного пара.

При длительной сушке достаточно отключать коллектор конденсата от конденсатора. Тогда только оставшаяся пленка конденсата в трубопроводах охлаждения может испаряться. В зависимости от размера газобалластного насоса это испарение может продолжаться 30-60 минут.

**Е. Если процесс сушки должен завершиться при низком давлении.**

Когда при предварительной или байпасной откачке достигнуто давление ниже  $10^{-2}$  мбар, парожеторный насос следует так же отключить.

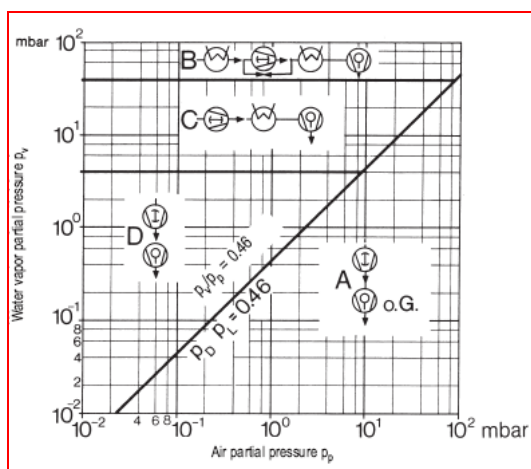


Рисунок 2.74. Области использования газобалластных насосов и конденсаторов для откачки паров воды (o.G. = без газобалласта)

### Сушка твердых веществ

Как отмечалось ранее, сушка твердых веществ создает сразу несколько проблем. Если не достаточно просто откачать камеру, а затем подождать, пока пары воды покинут твердое вещество. Этот метод технически возможен, но очень увеличивает время сушки.

Сделать время сушки как можно короче – непростая техническая задача. Важно содержание паров воды и толщина слоя высушиваемого вещества. Здесь описан только принцип сушки. Со всеми дополнительными вопросами обращайтесь в LEYBOLD.

Содержание влаги  $E$  в высушиваемом материале, коэффициент диффузии которой зависит от содержания влаги как функция времени сушки  $t$ , приблизительно выражается как:

$$E = \frac{E_0}{(1 + K \cdot t)^q} \% \quad (2.31)$$

$E_0$  – содержание влаги перед сушкой,  $q$  – зависящий от температуры коэффициент. Это выражение работает только для температур, при которых  $q$  был определен.  $K$  – коэффициент, который зависит от температуры, парциального давления паров воды рядом с материалом, размеров и свойств материала.

С помощью этого приближенного уравнения можно оценить характеристики для сушки различных веществ. Если  $K$  и  $q$  можно определить при различных температурах и парциальных давлениях паров воды, значения для других температур можно легко интерполировать, так что процесс сушки можно рассчитать при всех рабочих условиях. С помощью такого подхода можно сравнивать процесс сушки материала с известными свойствами с процессом сушки материала с другими свойствами.

### Основные правила при сушке материалов:

Эксперименты показывают, что самое короткое время сушки получается, если парциальное давление паров воды над поверхностью материала относительно высокое. Это возможно, т.к. теплопроводность между источником тепла и материалом выше при высоком давлении, а сопротивление диффузии в слое влажной поверхности меньше, чем в сухой. Чтобы поддерживать условия влажной поверхности, давление в камере должно контролироваться. Если необходимое постоянно поддерживаемое относительно высокое парциальное давление паров воды нельзя обеспечить, то работа конденсатора временно прерывают. Давление в камере возрастает, и поверхность материала снова становится влажной. Чтобы понизить парциальное давление паров

воды в камере при контролируемом давлении можно отрегулировать температуру хладагента в конденсаторе. В этом случае температура конденсатора достигнет установленного заранее значения, и парциальное давление паров воды можно понизить с помощью управления.

### 2.2.5 Создание безмасляного вакуума

Обратный поток паров рабочей жидкости, масла, смазочных материалов вращательных насосов и продуктов их разложения может значительно нарушать рабочие процессы в вакуумной камере. Поэтому для некоторых областей применения рекомендуется использовать насосы и устройства, которые исключают наличие паров углеводородов (масел).

#### а) Форвакуум 1013...1 мбар

Вместо вращательных насосов можно использовать большие водоструйные, парозжекторные или водокольцевые насосы. Для откачки объема и создания безмасляного форвакуума можно использовать подходят адсорбционные и магнито-разрядные насосы (раздел 2.1.8.1). Если без пластинчато-роторных насосов с масляным уплотнением нельзя обойтись, в основном следует использовать двухступенчатые пластинчато-роторные насосы. Небольшое количество паров масла в обратном потоке на входе можно полностью удалить сорбционной ловушкой во входном трубопроводе (раздел 2.1.4).

#### б) Средний вакуум

##### 1...10<sup>-3</sup> мбар

Для откачки большого количества газа в этом диапазоне давлений больше всего подходят большие парозжекторные насосы. Ртутные пароструйные насосы могут создать полностью безмасляный вакуум. В качестве мер предосторожности следует установить заливную азотную ловушку, чтобы опасные ртутные пары не попали в камеру. Для среднего вакуума сорбционные ловушки, описанные выше, можно устанавливать с двухступенчатыми пластинчато-роторными насосами для создания безмасляного вакуума до 10<sup>-4</sup> мбар.

Полностью безмасляный средний вакуум можно получить с помощью адсорбционных насосов. Т.к. откачка этими насосами легких и инертных газов очень мала, камеры, изначально заполненные воздухом, можно откачивать только до 10<sup>-2</sup> мбар. С помощью адсорбционных насосов давления ниже 10<sup>-3</sup> мбар можно получить только если неон или гелий не присутствуют в смеси газов. В таких случаях полезно вытеснить воздух из камеры, напустив в нее азот, а затем откачать ее.

#### с) Высокий и сверхвысокий вакуум <10<sup>-3</sup> мбар

Когда в откачиваемый объем в этом диапазоне давления подается достаточное количество газа, следует использовать турбомолекулярные насосы или крионасосы. Магнито-разрядные насосы отлично подходят для поддержания низкого давления в течение длительного периода в герметичных камерах, в которых не образуется большое количество газа. Турбомолекулярные насосы с магнитным подвесом так же гарантируют получение полностью безмасляного вакуума. Однако когда эти насосы выключены, пары масла могут проникнуть в камеру через насос. Использование подходящих средств (изолирующих клапанов, напуск азота в камеру) поможет предотвратить загрязнение стенок камеры при выключенном насосе. Если при работе с турбомолекулярным насосом есть выделение масла, то в качестве безмасляных форвакуумных насосов следует использовать гибридные турбомолекулярные, диафрагменные насосы или классические турбомолекулярные насосы вместе со спиральными.

### 2.2.6 Методы работы со сверхвысоким вакуумом

По методу работы очень сложно точно отделить высокий вакуум от сверхвысокого. На практике границу между ними определяют так, чтобы давления в области высокого вакуума можно было получить с помощью обычных насосов, клапанов, уплотнений и других компонентов, тогда как для получения давлений из области сверхвысокого вакуума требуются другие технологии и иначе спроектированные компоненты. «Граница» проходит около 10<sup>-8</sup> мбар. Поэтому давления ниже 10<sup>-7</sup> мбар следует относить к области сверхвысокого вакуума.

Плотность газа в области сверхвысокого вакуума очень маленькая, и значительное влияние оказывает процесс дегазации (обезгаживания) стенок камеры и крошечные течи в соединениях. Более того, в ряде областей применения для характеристики сверхвысокого вакуума важным становится время образования монослоя (уравнение 1.21). Под ним понимается время, затраченное на создание на идеально чистой поверхности мономолекулярного или одноатомного слоя, осевшего из частиц газа. Подразумевается, что каждая частичка газа, которая попадает на поверхность находит свободное место и занимает его. Формула для времени  $\tau$  :

$$\tau = \frac{3.2}{p} \cdot 10^{-6} \text{ с}, (p \text{ в мбар})$$

Поэтому в сверхвысоком вакууме ( $p < 10^{-7}$  мбар) время образования монослоя составляет от нескольких минут до часов и бо-



лее, что достаточно для эксперимента или технологического процесса в вакууме. Последнее чрезвычайно актуально для исследований в области физики твердого тела, при изучении тонких пленок или электронно-лучевых технологиях. Сверхвысоковакуумные системы отличаются от обычных высоковакуумных систем следующим:

- а) течи очень маленькие (использование металлических уплотнений),
- б) поток газа с внутренних поверхностей камеры и других компонентов (трубопроводов, клапанов, уплотнений) должен быть очень маленьким,
- с) устанавливаются подходящие компоненты (охлаждаемые ловушки, экраны) для предотвращения обратного потока паров масла и продуктов его распада от насоса в исследовательскую камеру (нет обратного потока).

Чтобы соответствовать этим условиям отдельные компоненты сверхвысоковакуумных установок необходимо прогревать и обеспечивать хорошую герметичность. В сверхвысоковакуумных системах лучше всего использовать нержавеющую сталь.

Конструкция, запуск и порядок работы со сверхвысоковакуумными системами так же требуют особого внимания, чистоты и времени. Сборка должна быть соответствующей: отдельные компоненты не должны быть поврежденными (например царапины на точно обработанных уплотняющих поверхностях). В основном только что собранные сверхвысоковакуумные системы перед работой должны проходить проверку герметичности с использованием гелиевых течеискателей. Особенно важно проверить соединения (фланцевые соединения), сварные или паяные соединения. **После испытаний системы необходимо прогреть.** Это необходимо для стеклянных и металлических систем. Прогреть надо не только камеру, но и компоненты, особенно вакуумметры. Отдельные стадии прогрева могут длиться несколько часов для больших систем, а температура прогрева выбирается с учетом требований технологического процесса и предельного давления. Если после охлаждения системы и принятия всех необходимых мер (охлаждение ловушек, экранов), предельное давление не достигается, рекомендуется снова проверить герметичность с помощью гелиевого течеискателя. Описание компонентов, методов уплотнения и вакуумметров приведено в каталоге продукции LEYBOLD.

## 2.3 Откачка вакуумной камеры и определение размера насоса

При определении размеров вакуумной системы возникают два основных независимых вопроса:

1. какую быстроту действия должна обеспечить система откачки, чтобы понизить давление до требуемого значения в данном объеме за указанное время?
2. какую быстроту действия должна обеспечить система откачки во время технологического процесса, чтобы высвобождающиеся газы и пары могли откачиваться пока давление (рабочее) в камере не повысилось?

Во время откачки в некоторых процессах (сушка, прогрев) в камере появляются пары, которые обычно не присутствуют в ней, поэтому встает третий вопрос:

3. какую быстроту действия должна обеспечить система откачки, чтобы можно было завершить процесс за определенное время.

Под **эффективной быстротой действия** насоса понимается **реальная быстрота действия** насоса для газа, **преобладающего в камере**. Можно определить номинальную быстроту действия насоса исходя из эффективной быстроты действия, если известны проводимости (сопротивления) экранов, ловушек, клапанов, фильтров и трубопроводов, расположенных между насосом и вакуумной камерой (раздел 1.5.2...1.5.4). При определении требуемой номинальной быстроты действия подразумевается, что вакуумная система герметична, поэтому течи пренебрежимо малы, что газ немедленно удаляется из системы, а давление в системе не изменяется (раздел 5). Вопросы 1-3 характеризуют три основных применения вакуумной технологии:

1. откачка камеры до достижения указанного давления.
2. откачка непрерывно подаваемых газов и паров при указанном давлении.
3. откачка газов и паров, образующихся во время процесса при изменении температуры и давления.

Начальная откачка вакуумной камеры оказывает влияние в среднем, высоком и сверхвысоком вакууме при постоянной подаче газа, т.к. в этих областях выход газа и пара со стенок камеры более значителен, т.к. он определяется размерами и расположением вакуумной системы.

### 2.3.1 Откачка вакуумной камеры (без дополнительных источников газа или пара)

В силу описанных выше факторов предполагаемое время откачки будет различным при откачке камеры в зависимости от области вакуума.



### 2.3.1.1 Откачка камеры в области низкого вакуума

В этом случае требуемая эффективная быстрота действия  $S_{eff}$  определяется только требуемым давлением  $p$ , объемом камеры  $V$  и временем откачки  $t$ .

При постоянной быстроте действия  $S_{eff}$  и предположении, что предельное давление  $p_{end}$ , обеспечиваемое насосом такое, что  $p_{end} < p$ , давление  $p(t)$  в камере уменьшается со временем согласно уравнению:

$$-\frac{dp}{dt} = \frac{S_{eff}}{V} \cdot p \quad (2.32)$$

В начале при 1013 мбар, время  $t = 0$ , эффективная быстрота действия рассчитывается в зависимости от времени откачки  $t$  из уравнения 2.32:

$$\int_{1013}^p \frac{dp}{p} = -\frac{S_{eff}}{V} \cdot t \quad (2.33.a)$$

$$\ln \frac{p}{1013} = -\frac{S_{eff}}{V} \cdot t \quad (2.33.b)$$

$$\begin{aligned} S_{eff} &= \frac{V}{t} \cdot \ln \frac{1013}{p} = \\ &= \frac{V}{t} \cdot 2.3 \cdot \log \frac{1013}{p} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Введение безразмерного коэффициента в уравнение 2.34

$$\sigma = \ln \frac{1013}{p} = 2.3 \cdot \log \frac{1013}{p} \quad (2.34.a)$$

Отношение между эффективной быстротой откачки  $S_{eff}$  и временем откачки дает

$$S_{eff} = \frac{V}{t} \cdot \sigma \quad (2.35)$$

Отношение  $V/S_{eff}$  обычно указывается как постоянная времени  $\tau$ . Т.е. время откачки вакуумной камеры от атмосферного давления до давления  $p$  определяется как

$$t = \tau \cdot S \quad (2.36)$$

$$c \quad \tau = \frac{V}{S_{eff}}$$

$$и \quad \sigma = \ln \frac{1013}{p}.$$

Зависимость коэффициента от желаемого давления показана на рис. 2.75. Следует заметить, что быстрота действия одноступенчатого пластинчато-роторного и поршневого насосов понижается ниже 10 мбар с газобалластом и ниже 1 мбар без газобалласта. Это поведение различно для насосов разных размеров и типов, но его не следует игнорировать при определении зависимости времени откачки от размера насоса. Нужно заметить, что уравнения (2.32-2.36) и рис. 2.75 применимы тогда, когда предельное давление, достижимое насосом, на несколько порядков ниже желаемого давления.

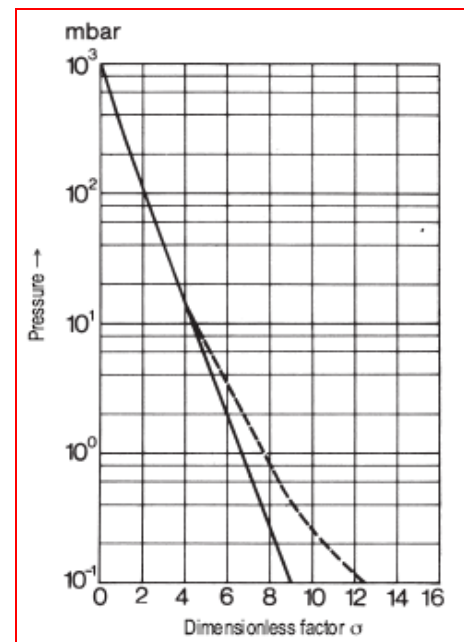


Рисунок 2.75. Зависимость безразмерного коэффициента  $\sigma$  при расчетах времени откачки  $t$  по уравнению 2.36. Штриховая линия применима для одноступенчатого насоса когда быстрота действия падает ниже 10 мбар.

**Пример:** вакуумная камера объемом 500 л будет откачиваться до давления 1 мбар за 10 минут. Какая требуется эффективная быстрота действия?

$$500 \text{ л} = 0,5 \text{ м}^3; 10 \text{ мин} = 1/6 \text{ ч},$$

Из уравнения 2.34 следует:





$$S_{eff} = \frac{0.5}{1/6} \cdot 2.3 \cdot \log \frac{1013}{1} =$$

$$= 3 \cdot 2.3 \cdot 3.01 = 20.8 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Для приведенного примера можно получить значение 7 из рис. 2.75 по сплошной линии, а по штриховой линии - значение 8. Согласно уравнению 2.35 получим

$$S_{eff} = \frac{0.5}{1/6} \cdot 7 = 21 \text{ м}^3/\text{ч}$$

или 
$$S_{eff} = \frac{0.5}{1/6} \cdot 8 = 24 \text{ м}^3/\text{ч}$$

с учетом того, что быстрота действия падает ниже 10 мбар. Требуемая эффективная быстрота действия составляет 24 м<sup>3</sup>/ч.

### 2.3.1.2 Откачка камеры в области высокого вакуума

Для области высокого вакуума значительно сложнее дать общие формулы. Т.к. время откачки для достижения высоковакуумного давления зависит только от выхода газов из внутренних поверхностей камеры, то состояние и предварительная обработка этих поверхностей имеет большое значение в вакуумной технологии. Недопустимо использованием материалов, содержащих поры или, особенно в связи с прогревом, полости. Внутренние поверхности должны быть максимально гладкими (истинная поверхность = геометрической поверхности) и достаточно чистыми (очищенными от смазки). Процесс выхода газов с поверхности сильно зависит от выбора материала и состояния поверхности. Полезные данные приведены в табл. 10 (раздел 9). Выход газов можно определить экспериментально только при проведении теста повышения давления: система откачивается до максимально возможного давления, затем камера изолируется от насоса с помощью клапана. Теперь в течении времени через промежуток проводят измерения давления в камере. Количество газа Q, которое повысило давление за период времени можно определить так:

$$Q = \frac{\Delta p \cdot V}{t} \quad (2.37)$$

( $\Delta p$  – измеренный перепад давления)

Количество газа Q включает сумму всех поступающих газов и возможных течей. Определить источник выхода газов или течи можно следующим методом.

Количество газа, выходящее из поверхностей со временем станет меньше, а количество газа, падающее через течи остается постоянным. Экспериментально это не всегда легко измерить, т.к. это требует много времени. Процесс дегазации завершается когда измеряемая кривая зависимости давления от времени достигнет постоянной (почти постоянной) производной, и это означает течи (см. раздел 5 – Течи и течеискание).

Если количество высвобождающегося газа Q и требуемое давление  $p_{end}$  известны, легко определить необходимую эффективную быстроту действия:

$$S_{eff} = \frac{Q}{p_{end}} \quad (2.38)$$

**Пример:** вакуумная камера объемом 500 м и площадью поверхности (включая всю систему) примерно 5 м<sup>2</sup>. Количество газа дегазации – 2·10<sup>-4</sup> мбар/л/с с 1 м<sup>2</sup> площади. Этот уровень возможен при подсоединении к вакуумной камере клапана или вводов вращения. В системе поддерживается давление 1·10<sup>-5</sup> мбар. Насос должен иметь быстроту действия:

$$S_{eff} = \frac{5 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-5}} = 100 \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

Быстрота действия 100 л/с требуется для непрерывной откачки количества газа, протекающего через течи и высвобождающегося из стенок камеры. Процесс откачки аналогичен примерам в разделе 2.3.1.1. Однако в случае с диффузионными насосами процесс откачки не начинается при атмосферном давлении, а при форвакуумном давлении вместо  $pV$ . Уравнение 2.34 преобразуется в:

$$S_{eff} = \frac{V}{t} \cdot \ln \frac{p_V}{p} = \frac{V}{t} \cdot \ln K$$

При выпускном давлении  $p_V = 2 \cdot 10^{-3}$  мбар коэффициент компрессии K будет:

$$K = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-5}} = 200$$

Чтобы достичь предельное давление 1·10<sup>-5</sup> мбар через 5 минут после начала откачки с помощью диффузионного насоса требуется эффективная быстрота действия

$$S_{eff} = \frac{500}{5 \cdot 60} \cdot 2.3 \cdot \log 200 \approx 9 \frac{\text{л}}{\text{с}}$$



Это намного меньше по сравнению с эффективной быстротой действия, необходимой для поддержания предельного давления. Время откачки и предельное давление в области высокого и сверхвысокого вакуума в основном зависит от герметичности системы (наличия течей) и дегазации со стенок камеры. Здесь нельзя использовать математические правила. Рекомендуется изучить специальную литературу.

### 2.3.1.3 Откачка камеры в области среднего вакуума

В области форвакуума объем камеры влияет на время процесса откачки. В области высокого вакуума значительную роль играет поток дегазации со стенок камеры. В области среднего вакуума на процесс откачки влияют оба этих фактора. Более того, в области среднего вакуума особенно при использовании вращательных насосов предельное давление  $p_{end}$  является более значимым. Если количество газа, входящего в камеру, известно и равно потоку  $Q$  (мбар·л/с) со стенок камеры и течей, уравнение 2.32 для процесса откачки станет:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{S_{eff}(p - p_{end}) - Q}{V} \quad (2.39)$$

Интегрирование уравнения приведет к

$$t = \frac{V}{S_{eff}} \ln \frac{(p_0 - p_{end}) - Q/S_{eff}}{(p - p_{end}) - Q/S_{eff}} \quad (2.40)$$

где  $p_0$  – давление в начале процесса откачки,  $p$  – требуемое давление.

В отличие от уравнения 2.33b это уравнение не дает точного решения для  $S_{eff}$ , поэтому эффективную быстроту откачки для известного потока газа нельзя определить по кривой давление – время без дополнительной информации.

Поэтому на практике использую следующий метод для определения быстроты действия насоса.

- быстроту действия вычисляют по уравнению 2.34 без учета потока дегазации и требуемого времени откачки.
- определяют отношение потока газа и быстроты действия. Это отношение должно быть меньше требуемого давления в целях безопасности как минимум в 10 раз. Если это условие не выполняется, необходимо выбрать насос с большей быстротой действия.

### 2.3.2 Определение насоса для предварительной откачки

Количество газов или паров, проходящее через высоковакуумный насос так же должно проходить и через форвакуумный насос (предварительной откачки). Более того, при работе высоковакуумного насоса (диффузионного, турбомолекулярного) максимальное допустимое выпускное давление не должно превышать даже на короткий период. Если  $Q$  – эффективное количество газов и паров, которое откачивается высоковакуумным насосом с эффективной быстротой действия  $S_{eff}$  при входном давлении  $p_A$ , это же количество газа должно проходить через форвакуумный насос с быстротой действия  $S_V$  при выпускном давлении  $p_V$ . Для эффективной производительности  $Q$  используется уравнение:

$$Q = p_A \cdot S_{eff} = p_V \cdot S_V \quad (2.41)$$

Требуемая эффективная быстрота действия форвакуумного насоса вычисляется из:

$$S_V = \frac{p_A}{p_V} \cdot S_{eff} \quad (2.41.a)$$

**Пример:** при использовании диффузионного насоса с быстротой действия 400 л/с эффективная быстрота действия составляет 50% от указанного в каталоге значения при использовании экрана. Максимальное допустимое выпускное давление составляет  $2 \cdot 10^{-1}$  мбар. Минимальная требуемая быстрота действия форвакуумного насоса зависит от входного давления  $p_A$  согласно уравнению 2.41.a.

При входном давлении  $1 \cdot 10^{-2}$  мбар быстрота действия высоковакуумного насоса (указана в каталоге) составляет 100 л/с, соответственно 50% от нее равны 50 л/с. Поэтому быстрота действия форвакуумного насоса должна быть как минимум

$$S_V = \frac{1 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-1}} \cdot 50 = 2.5 \frac{\text{л}}{\text{с}} = 9 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

При входном давлении  $p_A = 1 \cdot 10^{-3}$  мбар насос уже достигнет своей номинальной быстроты действия 400 л/с, эффективная быстрота откачки теперь равна  $S_{eff} = 200$  л/с, т.е. требуемая быстрота откачки форвакуумного насоса будет равна

$$S_V = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-1}} \cdot 200 = 1 \frac{\text{л}}{\text{с}} = 3.6 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$



Если высоковакуумный насос используется для откачки паров в диапазоне  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  мбар, тогда необходимо использовать форвакуумный насос с быстротой действия  $12 \text{ м}^3/\text{ч}$ , который сможет откачивать со скоростью  $9 \text{ м}^3/\text{ч}$  при давлении  $2 \cdot 10^{-1}$  мбар. Если пары не откачиваются, то подойдет одноступенчатый вращательный пластинчатороторный насос, работающий без газобалласта. Если присутствию пары (даже небольшое количество), в качестве форвакуумного насоса следует использовать двухступенчатый насос с газобалластом, который обеспечит с газобалластом нужную быстроту действия при давлении  $2 \cdot 10^{-1}$  мбар.

Если высоковакуумный насос будет использоваться только при входном давлении ниже  $10^{-3}$  мбар, нужен будет меньший форвакуумный насос. В этом примере это будет насос, обеспечивающий быстроту действия  $6 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Если непрерывное входное давление будет ниже, чем  $10^{-4}$  мбар, по уравнению 2.41а можно рассчитать требуемую быстроту действия форвакуумного насоса:

$$S_V = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-1}} \cdot 200 = 0.1 \frac{\text{л}}{\text{с}} = 0.36 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Теоретически в этом случае можно использовать меньший форвакуумный насос с быстротой действия около  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Но на практике следует устанавливать больший форвакуумный насос, т.к. особенно при запуске вакуумной системы в течение короткого периода может присутствовать большое количество газа. Работа высоковакуумного насоса будет находиться под угрозой, если форвакуумный насос не сможет сразу же откачивать такое количество газа. При постоянной работе при низком входном давлении рекомендуется устанавливать балластный объем (камеру в форвакуумном трубопроводе или буферный резервуар) между высоковакуумным и форвакуумным насосами. Затем форвакуумный насос должен работать только в течение короткого периода. Никогда нельзя превышать допустимое выпускное давление. Размер балластного объема зависит от общего количества газа, откачиваемого за единицу времени. Если скорость очень низкая, правило гласит, что  $0,5 \text{ л}$  балластного объема дают  $1 \text{ мин}$  времени откачки с изолированным форвакуумным насосом.

При поиске наиболее подходящего размера форвакуумного насоса в большинстве случаев можно

использовать графический метод. В этом случае начальной точкой будет характеристика быстроты действия по уравнению 2.41.

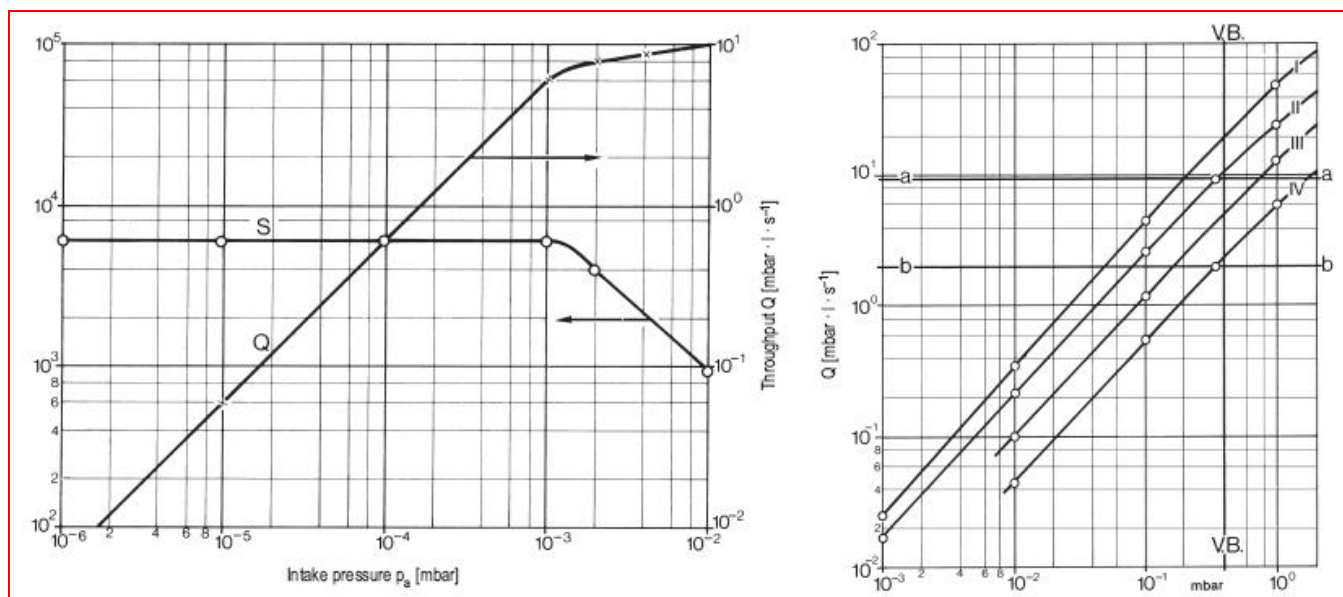
Характеристика быстроты действия насоса получается просто из измерения быстроты действия насоса (объемного потока) как показано на рис. 2.76 для диффузионного насоса  $6000 \text{ л/с}$  (кривая S). Чтобы получить производительность (кривая Q на рис. 2.76), необходимо умножить каждое значение быстроты S на соответствующее значение  $p_d$  и вычертить относительно значения. Считается, что входное давление диффузионного насоса не превышает  $10^{-2}$  мбар, максимальная производительность  $9,5 \text{ мбар} \cdot \text{л/с}$ .

Размер форвакуумного насоса должен быть таким, чтобы эта производительность могла поддерживаться насосом при входном давлении (форвакуумного насоса), которое равно или меньше максимального допустимого выпускного давления диффузионного насоса, т.е.  $4 \cdot 10^{-1}$  мбар для диффузионного насоса на  $6000 \text{ л/с}$ .

После расчетов характеристик быстроты действия экономически выгодных двухступенчатых вращательных плунжерных насосов, таким же образом проводится расчет производительности для каждого насоса, чтобы использовать кривую Q для диффузионного насоса на рис. 2.76.а. Результатом расчета будет группа кривых Q (1-4 на рис. 2.76 б). Поэтому рассматриваются 4 двухступенчатых плунжерных насоса с номинальными скоростями действия  $200, 100, 50$  и  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Критическое выпускное давление диффузионного насоса отмечено V.B. ( $p=0,4$  мбар). Максимальная производительность  $Q=9,5 \text{ мбар} \cdot \text{л/с}$  показана горизонтальной линией а. Эта линия пересекает 4 кривые производительности. Считая справа налево, первая точка пересечения соответствует критическому давлению ниже  $0,4$  мбар с кривой производительности 2. Она соответствует двухступенчатому плунжерному насосу с номинальной быстротой действия  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Поэтому этот насос обеспечит корректное выпускное давление для диффузионного насоса  $6000 \text{ л/с}$  при данных условиях.

Однако, если процесс откачки такой, что максимальная производительность  $9,5 \text{ мбар} \cdot \text{л/с}$  маловероятна, то можно использовать меньший насос. Например, на рис. 2.76.б линии b соответствует максимальная производительность  $2 \text{ мбар} \cdot \text{л/с}$ . В этом случае будет достаточно двухступенчатого плунжерного насоса с быстротой  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$





а) характеристика скорости действия диффузионного насоса 6000л/с

б) набор кривых производительности двухступенчатого плунжерного насоса (VB = критическое выпускное давление)

Рисунок 2.76. Диаграммы для графического определения подходящего форвакуумного насоса

### 2.3.3 Определение времени откачки по номограмме

На практике при определении стоимости затрат расчет времени откачки от эффективной скорости действия  $S_{eff}$ , требуемого давления  $p$  и объема камеры  $V$  по формулам будет сложным и длительным. Полезнее использовать номограммы. Используя номограммы, приведенные в разделе 9, рис. 9.7 можно быстро определить время откачки с помощью вращательных насосов, если скорость действия насоса постоянна в указанном диапазоне давления. Изучив представленные примеры можно легко понять принцип использования номограмм.

Время откачки пластинчато-роторным и поршневым насосами до давления, при котором скорость действия насоса постоянна, можно определить с помощью примера 1.

В общем, насосы Рутса не имеют постоянной скорости действия в рабочей области. Для определения времени откачки обычно достаточно скорости действия. Примеры номограмм 2 и 3 показывают, что для насосов Рутса коэффициент компрессии  $K$  относится не к атмосферному давлению (1013 мбар), а к давлению, при котором насос Рутса включается.

В области среднего вакуума поток дегазации и со стенок и течей становится более явным. Из номограммы 9.10 в разделе 9 можно получить приблизительные расчеты времени откачки для этой области вакуума.

В большинстве областей применения целесообразно определять достижимое давление в данный момент времени во время откачки. Это легко сделать с учетом номограммы 9.7 в разделе 9.

В первом примере характеристика скорости действия, т.е. взаимосвязь давления  $p$  (указанного как требуемое давление  $p_{end}$ ) и времени откачки  $t_p$  определяется из номограммы для откачки камеры объемом  $5 \text{ м}^3$  одноступенчатым плунжерным насосом E250 с эффективной скоростью действия  $S_{eff} = 250 \text{ м}^3/\text{ч}$  и предельным давлением  $p_{end,p} = 3 \cdot 10^{-1} \text{ мбар}$  при работе с газобалластом и  $p_{end,p} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ мбар}$  при работе без газобалласта. Постоянная времени  $\tau = V/S_{eff}$  (уравнение 2.36) одинакова в обоих случаях и составляет как на номограмме 9.7 примерно 70 с (столбец 3). Для любого данного значения  $p_{end} > p_{end,p}$  прямая линия, соответствующая 70с в столбце 3 при значении  $(p_{end} - p_{end,p})$  в правой шкале столбца 5 дает соответствующее значение  $t_p$ . Результат этого действия показан на рис. 2.77 – кривые а и б.

Иногда очень утомительно определять отношение  $(p_{end}, t_p)$  для комбинации насосов. Во втором примере рассматривается откачка камеры объемом  $5 \text{ м}^3$  с помощью комбинации насосов Рутса WA1001 и форвакуумного насоса E250 (как в предыдущем примере). Откачка начинается с работы одного насоса E250 без газобалласта,

пока насос Рутса не включится при давлении 10 мбар. Т.к. характеристика комбинации насосов WA1001/E250 по сравнению с характеристикой насоса E250, не имеет столь длинного горизонтального участка в диапазоне давления (по сравнению с соответствующим направлением характеристики WA1001/E250 на рис. 2.19), можно ввести приближенное среднее значение  $S_{\text{eff}}$ , относящееся к определенному диапазону давления. Для этого случая применимо следующее:

$$S_{\text{eff}} = 800 \text{ м}^3/\text{ч} \text{ в диапазоне } 10 \dots 1 \text{ мбар}$$

$$S_{\text{eff}} = 900 \text{ м}^3/\text{ч} \text{ в диапазоне } 1 \dots 5 \cdot 10^{-2} \text{ мбар}$$

$$S_{\text{eff}} = 500 \text{ м}^3/\text{ч} \text{ в диапазоне } 5 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-3} \text{ мбар}$$

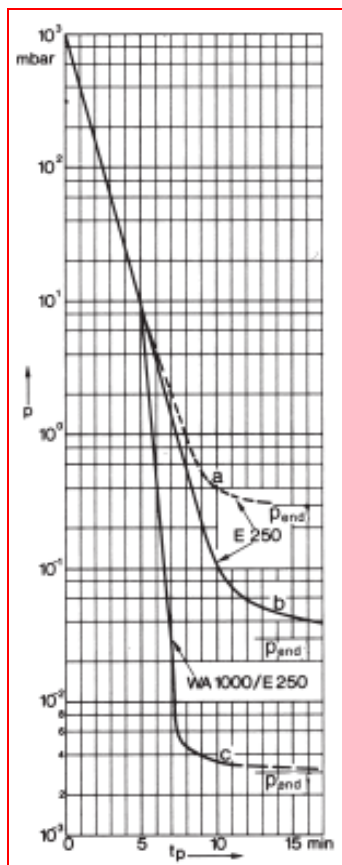


Рисунок 2.77. Время откачки  $t_p$  камеры объемом  $5 \text{ м}^3$  плунжерным насосом E250 с номинальной быстротой действия  $250 \text{ м}^3/\text{ч}$  с газобалластом (a) и без (b) и комбинации насосов Рутса и плунжерного WA1001/E250 в области 10 мбар для WA1001(c)

Предельное давление комбинации насосов WA1001/E250  $p_{\text{end}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ мбар}$ . Из этих рис. можно определить соответствующие постоянные времени по номограммам. Из этого можно определить время откачки  $t_p$ , рассчитав снижение давления R в левом столбце 5. Результат – кривая с на рис. 2.77.

**Автоматизированный расчет LEYBOLD** Расчеты промышленных систем выполняются с помощью компьютерных программ. Необходимы

мощные компьютеры, и они не подходят для простых начальных расчетов.

### 2.3.4 Откачка камеры, в которую подаются газы или пары

Процесс определения времени откачки значительно изменяется, если в камеру подаются газы или пары. Во время прогрева может выделяться большое количество паров с поверхности камеры при ее очистке. Результирующее время откачки зависит от очень многих параметров. Увеличение нагрева стенок камеры сопровождается увеличением десорбции газов и паров со стенок. Однако, т.к. высокая температура приводит к увеличению выхода газов и паров из стенок, скорость, с которой они могут удаляться из камеры, так же возрастает.

Значение допустимой температуры прогрева будет в значительной мере определяться материалом камеры. Точное время откачки можно вычислить, только если известно количество входящих и откачиваемых паров. Однако, за исключением процессов сушки это рассматривается очень редко и не содержится в этой книге.

### 2.3.5 Выбор насоса для сушки

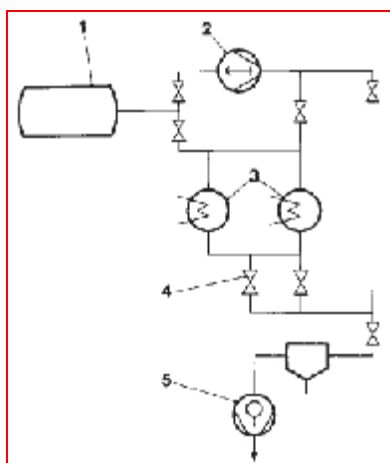
Необходимо провести различие между процессами кратковременной и длительной сушки, которая может длиться несколько часов или даже дней. Независимо от длительности сушки все процессы сушки коротко описаны в разделе 2.2.4. В качестве примера приведен процесс сушки соли (кратковременная сушка), являющийся хорошо отработанным процессом.

#### Сушка соли

Возьмем 400 кг тонко дисперсионного раствора соли и воды, содержащего примерно 8% массы сухого вещества, которое нужно высушить в максимально короткое время (примерно за час), пока содержание воды станет меньше 1% от массы. Предполагаемое количество выделяемой воды 360 кг. Соль в камере во время сушки постоянно перемешивается и нагревается до  $80^\circ\text{C}$ . Схема вакуумной системы представлена на рис. 2.78.

Во время первой четверти времени сушки извлекается больше половины паров воды. Конденсатор является главным действующим насосом. Из-за высокой температуры и очень высокого давления паров воды в начале процесса сушки эффективность конденсации конденсатора сильно возрастает. Из рис. 2.78 становится понятно, что два параллельных конденсатора каждый с  $1 \text{ м}^2$  конденсирующей поверхности могут вместе сконденсировать около 15 л воды при входном давлении 100 мбар за 15 мин. Однако во время этого начального процесса нужно гарантировать,

что давление паров воды на входном порту вращательного насоса не превысит 60 мбар (см. раздел 2.1.5). Т.к. форвакуумный насос откачивает только маленькую часть неконденсируемых газов на этой ступени, то будет достаточно такого насоса как одноступенчатый поршневой насос TRIVAC S65. С течением времени процесса, конденсация паров воды падает, как и давление в конденсаторе. После того, как давление в камере упадет ниже 27 мбар, включается насос Рутса (RUVAC WA501). Т.к. теперь пары воды из камеры откачиваются быстрее, возрастет давление в конденсаторе, и его эффективность конденсации снова увеличится. Конденсаторы изолируются с помощью клапанов, когда давление в них достигает давления насыщенного пара. В этот момент давление паров воды в камере составляет только 4 мбар, и откачка завершается насосом Рутса с форвакуумным насосом с газобалластом, пока давление паров воды не достигнет значения 0,65 мбар. Как показывают опыты, теперь соль имеет нужную степень влажности.



1. вакуумная камеры с солью
2. RUVAC WA501
3. конденсаторы
4. дросселирующий клапан
5. поршневой насос

Рисунок 2.78. Схема вакуумной сушилки соли. Комбинация насосов состоит из насоса Рутса, конденсаторов, поршневого насоса для пошаговой откачки (см. текст)

### Сушка бумаги

Если насосы корректно подобраны для длительного процесса, выгодно прерывать процесс. В качестве примера приводится сушка бумаги, когда начальная влажность бумаги составляет 8%, а камера имеет объем  $V$ .

#### 1. откачка

Форвакуумный насос должен быть правильно подобран с учетом объема камеры и требуемого времени откачки. Это время откачки подбирается с учетом длительности процесса: если процесс завершится через 12-15 часов, время откачки не должно превышать 1 ч. Размер форвакуумного насоса можно рассчитать с учетом раздела 2.3.1.

#### 2. предварительная сушка

Во время предварительной сушки (в зависимости от диапазона давления, в котором проводятся работы) удаляется около 75% влажности. Период предварительной сушки должен занимать первую треть времени сушки. Скорость предварительной сушки в основном зависит от достаточности нагрева. В ходе предварительной сушки 1 тонны бумаги в течении 5 часов должно выпариться 60 кг воды, т.е. необходимо передать примерно 40 кВт энергии. Т.к. бумага должна в тоже время прогреться примерно до 120°C, то в среднем необходимо подать 20 кВт энергии. Количество пара в час – около 12 кг. Поэтому достаточно будет конденсатора на 15 кг/ч. Если бумага предварительно достаточно нагрета (в ходе воздушной сушки) перед откачкой, в первый час сушки можно ожидать двойное количество пара.

#### 3. основная сушка

Если на второй ступени давление в дальнейшие 5 часов упадет от 20 мбар до 5,3 мбар, и выделится 75% влажности (т.е. 19% общей влажности 15 кг), то насос должен иметь быстроту действия согласно уравнения 2.37 и 2.38:

$$S_{eff} = \frac{V \cdot \Delta p}{t \cdot p}$$

Согласно уравнению 1.7 с учетом 15 кг паров воды при 15°C:

$$V \cdot \Delta p = \frac{m \cdot R \cdot T}{M} = \frac{15 \cdot 83.14 \cdot 288}{18} \approx 20000 \text{ мбар} \cdot \text{м}^3$$

и соответственно

$$S_{eff} = \frac{20000}{5 \cdot 5.3} = 750 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Насос Рутса RUVAC WA1001 удовлетворит этим требованиям. Допустимая остаточная влажность продукции определяет допустимое предельное давление. Отношение между предельным давлением и остаточной влажностью устанавливается для каждого вида продукции, но отличается от партии к партии. LEYBOLD имеет многолетний опыт работы в этой области. Считаем, что требуется 0,1% остаточной влажности, для которой требуется предельное давление  $6 \cdot 10^{-2}$  мбар. В течение последних 5 часов удаляются оставшиеся 6% влажности или 5 кг воды. При давлении около 0,65 мбар откачивается паров 2000 м<sup>3</sup>/ч. Существуют две возможности:

а) продолжение работы с насосом Рутса WA1001. Общее предельное давление устанавливается как значение, соответствующее количеству откачиваемых паров воды. Нужно подож-

дать, пока давление достигнет значения  $6 \cdot 10^{-2}$  мбар, что обычно занимает больше времени.

b) сначала выбирается большой насос Рутса (например RUVAC WA2001 с быстротой действия  $2000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ). Для большого количества бумаги (например, 5000кг) подойдет такая система откачки, при которой быстрота действия для паров воды будет  $20000 \text{ м}^3/\text{ч}$  и автоматически снизит давление от 27 до  $10^{-2}$  мбар. При использовании таких насосов время сушки значительно снизится.

### 2.3.6 Фланцы и уплотнения

Разъемные соединения в металлических вакуумных компонентах, насосах, клапанах, трубопроводах и т.п. выполняются с помощью фланцев. Компоненты для низкого среднего и высокого вакуума, выпускаемые LEYBOLD, оборудованы в соответствии со стандартизированными фланцевыми системами:

\* **хомутовые маленькие фланцы (KF)** (соединения быстрой сборки по DIN 28 403) номинального размера ДУ 10, 16, 20, 25, 32, 40 и 50 мм. Предпочтительными размерами по рекомендациям PNEUROP и ISO (рекомендации технического соответствия ISO/TC112) являются 10, 16, 25 и 40 мм. Для полного соединения двух идентичных фланцев необходим один хомут и центрирующее кольцо.

\* **фланцы ISO-K с хомутом** номинального размера ДУ 65, 100, 160, 250, 320, 400, 500 и 630 мм. Номинальные размеры и конструкция этих соединений соответствуют рекомендациям PNEUROP и ISO/ TC112. Фланцы соединяются вместе с помощью хомута и зажимных колец. Для уплотнения используются центрирующие кольца и прокладки.

\* **фланцы ISO-F с болтами** таких же номинальных размеров что и фланцы ISO-K (согласно PNEUROP и ISO/ TC112). В некоторых случаях используют фланцы меньшего размера. Фланцы с хомутами и болтами соответствуют стандарту DIN 28 404.

Номинальный размер примерно равен внутреннему диаметру фланца в миллиметрах. Можно ожидать большее отклонение, т.к. фланец ISO-K DN63 имеет внутренний диаметр 70 мм (см. табл. 11 в разделе 9).

**Высоковакуумные** компоненты изготавливаются из алюминия или нержавеющей стали. компоненты из нержавеющей стали более дорогие, но сталь имеет ряд преимуществ: низкая дегазация, коррозионная стойкость, температура дегазации может достигать  $200^\circ\text{C}$ , большая стойкость к появлению царапин по сравнению с алюминием.

**Сверхвысоковакуумные** компоненты изготавливаются из нержавеющей стали и содержат CF фланцы, которые могут прогреваться при высокой температуре. Эти компоненты, включая фланцы, изготавливаются как серийная продукция с размерами в диапазоне номинальных размеров от 16 до 250 мм. CF фланцы выпускаются как жесткие фланцы или с вращающимися зажимными кольцами. Они могут соединяться с фланцами CONFLAT других производителей. В качестве уплотнений используются медные прокладки.

В основном, фланцы не следует делать меньше, чем соединяемые трубопроводы и компоненты, которые соединяют фланцы. Если в системе не производится откачка агрессивных газов и паров, и если система не прогревается выше  $80^\circ\text{C}$ , для диапазонов низкого среднего и высокого вакуума можно использовать фланцы с уплотнительными центрирующими кольцами из NBR (пербунан) или CR (неопрен). Часто перед окончательной сборкой проводят испытания вакуумной системы. Процесс дегазации всех компонентов из нержавеющей стали можно проводить при температуре  $200^\circ\text{C}$  без повреждений. Однако тогда использование уплотнительного материала пербунана недопустимо. Следует использовать уплотнительные кольца из VINILAN® (специальный FPM) и алюминиевые уплотнения, которые можно нагревать до  $150$  и  $200^\circ\text{C}$ . После прогрева вакуумной системы можно получить предельное давление около  $10^{-8}$  мбар, т.е. в области сверхвысокого вакуума.

Получение давления ниже  $10^{-8}$  мбар требует высоких температур прогрева. Как описано выше (раздел 2.2.6) работы в области сверхвысокого вакуума требуют другого подхода и необходимо использовать CF фланцы с металлическими уплотнительными кольцами.

### 2.3.7 Выбор подходящих клапанов

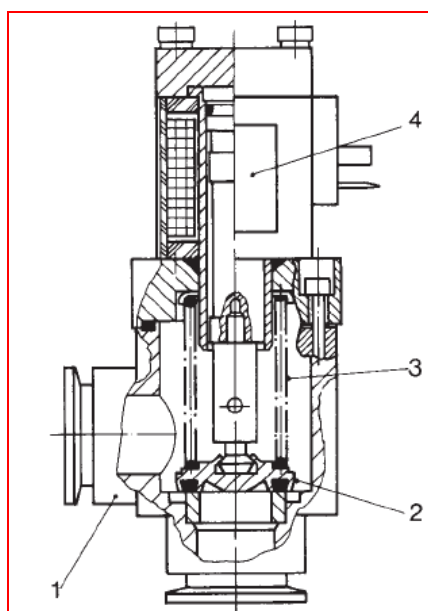
Вакуумная технология предъявляет большие требования к работоспособности и надежности клапанов, которые используются в большом количестве. Требования удовлетворяются только если корректное устройство отключения установлено для каждой области применения в зависимости от конструкции, принципа работы и размера. Более того, для принципа работы и конструкции большое значение имеют такие факторы как проводимость и герметичность клапана.

Клапаны проектируются так, чтобы они не снижали быстроту действия. Так, когда клапан полностью открыт, его проводимость в области низкого и среднего вакуума эквивалентна соответствующему трубопроводу. Например, проводимость углового будет эквивалентна проводимости изогнутой трубы с таким же внутренним диа-



метром и углом. Аналогично, проводимость клапана для молекулярного режима течения (в области высокого и сверхвысокого вакуума) столь высока, что не окажет влияния на течение. Действующие значения проводимости клапанов приведены в каталоге продукции.

Чтобы соответствовать требованиям герметичности, высоковакуумные клапаны спроектированы так, чтобы молекулы газа, осевшие на поверхность вала клапана не переходили из внешней атмосферы в вакуум во время работы. Такие клапаны оборудованы металлическими сильфонами для изоляции вала клапана от атмосферы или полностью закрыты, а между вакуумом и атмосферой существует только статическое уплотнение. К таким клапанам относятся все клапаны для среднего и высокого вакуума производства LEYBOLD, имеющие ручной или электропневматический привод (рис. 2.80 и 2.79). Уровень течи этих клапанов менее  $10^{-9}$  мбар·л/с.



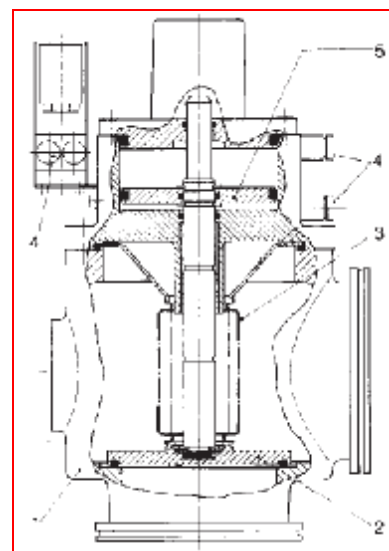
1. корпус
2. диск клапана
3. зажимная пружина
4. обмотка электромагнита

Рисунок 2.79. Угловой клапан с электромагнитным приводом

Клапаны с масляным уплотнением (или со смазкой) могут использоваться в особых случаях. Их уровень течи тоже около  $10^{-9}$  мбар·л/с. Особо выделяется маятниковый затвор. Несмотря на уплотнение, покрытой смазкой, течь между вакуумом и внешней атмосферой виртуальная, такая же как и для клапанов с уплотнением – сильфоном, т.к. при работе клапана, вал выполняет только вращательное движение, и поэтому молекулы газа не передаются в вакуум. Такие затворы LEYBOLD не производит.

Для рабочих давлений ниже  $10^{-7}$  мбар вполне подходят клапаны стандартной конструкции, т.к. материалы их уплотнений и корпусов такие, что

проникновение и обезгаживание очень незначительное. Если необходимо давление ниже  $10^{-9}$  мбар, необходим прогрев до  $200^{\circ}\text{C}$  и выше, то это потребует использование термостойких уплотнительных материалов (типа VITILAN®) и материалов высокой механической прочности с подготовленными (внутренними) поверхностями и низким потоком обезгаживания. Такие клапаны обычно изготавливаются из нержавеющей стали. Фланцы уплотняются алюминиевыми прокладками, чтобы избежать проблем с дегазацией уплотнений из эластомеров. В области сверхвысокого вакуума эти параметры имеют особое значение, поэтому в основном должны использоваться металлические уплотнения. Молекулы газа, оседающие на материале поверхности при давлении ниже  $10^{-9}$  мбар имеют большое значение. Их можно откачать только в течение разумного периода времени при одновременной дегазации. Для сверхвысоковакуумных систем требуемая температура прогрева составляет  $500^{\circ}\text{C}$ . Поэтому к материалам и конструкции уплотнения предъявляются особые требования. Необходимо использовать прокладки из золота или меди.



1. корпус
2. диск клапана
3. сильфон
4. подача сжатого воздуха
5. поршень

Рисунок 2.80. Угловой клапан с электропневматическим приводом

Различные области применения требуют различных приводов клапанов, т.е. клапанов с ручным, электропневматическим, электромагнитным приводом, клапаны с двигателем (активатором), такие как клапаны переменной течи. Различаются клапаны и по конструкции корпуса. Помимо различий в используемых материалах, существуют и конструктивные отличия (клапаны проходные, угловые). В зависимости от номинального размера и ожидаемой области применения, на клапане могут быть фланцы хомутовые (KF), ISO-K, ISO-F, CF (для сверхвысокого вакуума).



В дополнение к вакуумным клапанам, которые выполняют только функцию изоляции (положения полностью открыт /полностью закрыт) для особых функций требуются специальные клапаны. Типовыми являются клапаны с изменяемым потоком (течью) в диапазоне течи  $10^{-10}$  см<sup>3</sup>/с (NTP) до  $1,6 \cdot 10^3$  см<sup>3</sup>/с (NTP). Эти клапаны обычно с двигателем и подключены к вакуумметру, давление процесса можно установить и поддерживать. Другие специальные клапаны выполняют функции обеспечения безопасности, такие как быстрая автоматическая изоляция диффузионного насоса или вакуумной системы в случае перебоев в подаче питания, например, клапаны SECUVAC. В случае отключения питания, они отсоединят вакуумную систему от системы откачки и проведут напуск форвакуумной системы. Вакуумная система останется под минимальным давлением (около 200 мбар) после включения питания.

При откачке агрессивных газов и паров используются только клапаны из нержавеющей стали и с уплотнением из материала VITILAN®. Для ядерных технологий разработаны клапаны, уплотнения которых сделаны из специальных эластомеров или металлических прокладок. За получением дополнительной информации о конструкции и области применения обращайтесь в LEYBOLD.

### 2.3.8 Газовые шлюзы и арматура без уплотнений

В большинстве случаев желательно не только уплотнить (изолировать) наполненный газом или откачанный объем, но и иметь возможность проверить давление или вакуум в этом объеме через некоторое время и откачать дальше или добавить/ заменить газ.

Это можно легко сделать с помощью переходников без уплотнений производства LEYBOLD, которые работают через соответствующий газовый шлюз. Соединения с хомутовыми фланцами откачанной или заполненной газом камеры герметически уплотнены внутри трубки с помощью маленького компонента, образующего действующий клапан. Газовый шлюз, необходимый для работы, удаляется после откачки или заполнения га-

зом. Один такой газовый шлюз будет работать с рядом переходников без уплотнений. На рис. 2.81 показано сечение такого набора. Газовые шлюзы и переходники без уплотнений, выпускаемые LEYBOLD, имеют следующие номинальные размеры по DN 16 KF, DN 25 KF и DN 40 KF. Изготовлены из нержавеющей стали. Уровень течи менее  $10^{-9}$  мбар·л/с. Могут выдерживать превышение давления до 2,5 бар, повышение температуры до 150°C и защищены от грязи стандартной заглушкой.

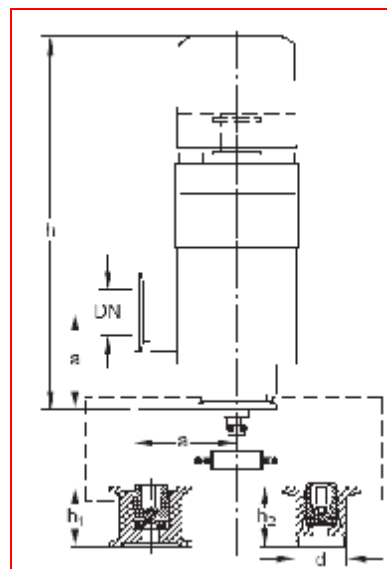


Рисунок 2.81. Газовый шлюз с центрирующим кольцом и переходник без уплотнения, вид в разрезе

Типовыми примерами использования являются камеры с двойными стенками с начальным вакуумом, такие как сосуд Дьюара, баллоны с жидким газом, длинные трубопроводы. Они так же используются для откачки или последующей откачки, поддержания вакуума в научно-исследовательских приборах. Предварительно необходимо иметь постоянно подключенный насос для последующей требуемой откачки. Хотя использование газовых шлюзов с переходниками без уплотнений обеспечивает герметичные уплотнения камеры, а насос необходим только время от времени для проверки или последующей откачки.

### 3 Вакуумные измерения, мониторинг, управление и регулирование

Давления, измеряемые сегодня в вакуумной технологии, лежат в диапазоне  $10^{13} \dots 10^{-12}$  мбар, т.е. более 15 порядков. Приведенный здесь диапазон можно показать, проведя аналогию с измерением длин – см. табл. 3.1

Аналогия измерений		
Метод определения	Абсолютное давление	Длина
Эмпирический мир	1 бар	1 м
Методы простого измерения	> 1 мбар	> 1 мм
Методы механического измерения	> $10^{-3}$ мбар	> 1 мкм
Косвенные методы	$10^{-9}$ мбар	$\approx 1/100$ Ø атома
Предельные косвенные методы	$10^{-12}$ мбар	$\approx 0.18$ Ø электрона

Таблица 3.1

Средства измерения, используемые для измерения давления в этом диапазоне, называются вакуумметрами. Т.к. невозможно по физическим причинам сделать вакуумметр, который мог бы выполнять измерения во всем диапазоне, выпускаются серии вакуумметров, каждый из которых имеет диапазон измерений, который обычно покрывает несколько порядков (рис. 9.16.а). Чтобы можно было распределить диапазоны измерения по отдельным типам вакуумметров, нужно согласиться с тем, что погрешность измерений возрастает очень быстро, в некоторых случаях до 100% на верхних и нижних пределах. Эта взаимосвязь показана на рис. 3.1, используя в качестве примера VISCOVAC. Поэтому необходимо сделать различия между диапазоном измерений, указанным в каталоге, и диапазоном измерений «точных» средств измерения. Диапазоны измерения отдельных вакуумметров ограничены сверху и снизу физическими эффектами.

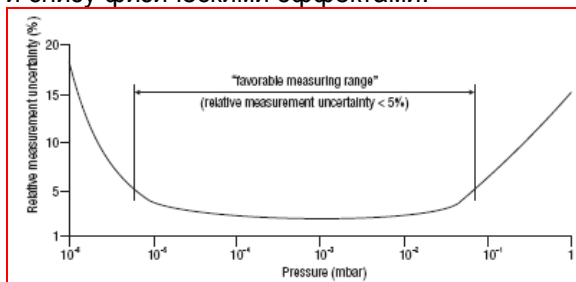


Рисунок 3.1. Распределение погрешности измерений в диапазоне измерений вакуумметра VISCOVAC

### 3.1 Основы измерения низких давлений

Вакуумметры являются приборами для измерения давления газа ниже атмосферного давления (DIN 28 400, часть 3, 1992г.). В большинстве случаев индикация давления зависит от рода газа. Для компрессионных вакуумметров следует отметить, что если присутствуют пары, то при компрессии может произойти конденсация, и в результате измерения давления будут неверными. Компрессионные вакуумметры измеряют сумму парциальных давлений всех неконденсируемых во время измерения компонентов газа. Таким путем можно измерить конечное парциальное давление механических компрессионных насосов (см. 1.1). Это давление можно измерить по-другому, т.е. заморозить конденсируемые компоненты с помощью охлаждающей ловушки LN<sub>2</sub>. Точные измерения парциальных давлений некоторых газов и паров выполняются с помощью средств измерения парциальных давлений, работающих по принципу масс-спектрометра (раздел 4).

#### Зависимость измерений давления от рода газа

Необходимо выделить следующие вакуумметры:

1. Приборы, которые определяют **давление как силу**, которая действует на площадь, так называемые датчики абсолютного давления. Согласно кинетической теории газов это сила, с которой частички соударяются между собой и стенками, зависит только от количества молекул газа на единицу объема (n количество частиц) и их температуры, а не от их молярной массы. **Показания прибора не зависят** от рода газа. К таким приборам относятся жидкостные и механические вакуумметры

2. Приборы **косвенного измерения давления**. В этом случае давление определяется как функция зависящего от давления (плотности, если более точно) свойства (теплопроводность, электропроводность, вероятность ионизации) газа. Эти свойства зависят от молярной массы так же как и от давления. **Показания давления таких приборов зависят от рода газа**.

Шкалы этих средств измерения давления всегда основаны на воздухе или азоте в качестве тестового газа. Для других газов и паров необходимо брать коэффициент коррекции (табл. 3.2). Для точных измерений давления при косвенном методе измерения вакуумметры, которые определяют плотность через приложение электрической энергии (косвенное измерение давления), важно

знать состав газа. На практике состав газа известен лишь приблизительно. В большинстве случаев, однако, вполне достаточно знать легкие или тяжелые молекулы преобладают в измеряемой смеси газов (т.е. водород или молекулы паров масла насоса).

Газ	Коэффициент коррекции, по N <sub>2</sub> (азот = 1)
He	6.9
Ne	4.35
Ar	0.83
Kr	0.59
Xe	0.33
Hg	0.303
H <sub>2</sub>	2.4
CO	0.92
CO <sub>2</sub>	0.69
CH <sub>4</sub>	0.8
Высшие углеводороды	0.1 – 0.4

Таблица 3.2 Коэффициент коррекции

**Пример:** если давление газа, состоящего в основном из молекул рабочей жидкости измерить с помощью ионизационного вакуумметра, показания давления (относительно воздуха или азота), как показано в табл. 3.2, увеличатся примерно в 10 раз.

Измерения давления в области низкого вакуума можно выполнить относительно точно с помощью средств прямого измерения давления. Измерения низких давлений, с другой стороны, почти всегда связаны с рядом фундаментальных ошибок, которые ограничивают точность измерений с самого начала, так что это не совместимо со степенью точности, обычно достигаемой средствами измерения. Чтобы измерить давление в области среднего и высокого вакуума с погрешностью менее 50%, необходимо соблюдать особую тщательность. Измерения давления, которые требуют точности в несколько процентов, в основном выполняются специальными средствами измерения. Это так же относится ко всем измерениям в области сверхвысокого вакуума ( $p < 10^{-7}$  мбар). Для корректной индикации давления вакуумметров, необходимо учесть расположение и способ подсоединения системы измерения. Во всех областях давления, где преобладает ламинарный поток ( $1013 > p > 10^{-1}$  мбар), необходимо обращать внимание на градиент давления, создаваемый откачкой. Сразу перед насосом (если смотреть со стороны камеры) создается более низкое давление, чем в камере. Даже компоненты, имеющие высокую проводимость, могут создавать такой градиент давления. Проводимость соединительного трубопровода между вакуумной системой и системой измерения не должна быть слишком маленькой, иначе трубопровод будет откачи-

ваться медленно в области давлений ламинарного потока. Показания вакуумметра будут завшенными.

В области высокого и сверхвысокого вакуума ситуация более сложная. В силу своей специфики такие системы могут иметь очень высокий вакуум или, при сильной дегазации стенок трубопровода, очень низкий. При этом можно получить предельно низкое давление из-за обезгаживания стенок вакуумметров или неадекватной дегазации системы измерения. Кроме того, в высоком и сверхвысоком вакууме выравнивание давления между вакуумной системой и измерительными трубками может занять много времени. По возможности следует использовать так называемые голые датчики. Они вставляются прямо в вакуумную систему, устанавливаются на фланце, без соединительного трубопровода или оболочки. Необходимо уделить особое внимание влиянию самого процесса измерения на измеряемое давление. Например, в ионизационном вакуумметре, который работает с горячим катодом, частички газа, особенно высшие углеводороды, забиваются термически. Это изменяет состав газа. Этот эффект играет роль в при измерении давления в области сверхвысокого вакуума. Это же применимо к очистке ионизационного вакуумметра, особенно вакуумметра Пеннинга (порядка  $10^{-2} \dots 10^{-1}$  л/с). Загрязнения системы измерений, наложения электрических и магнитных полей, ошибки в изоляции, недопустимо высокая температура окружающей среды пагубно влияют на измерения давления. Способы избежания ошибок и необходимые методы устранения определяются индивидуально для системы измерений и приведены в виде общих рекомендаций в разделе 8.4.

### Выбор вакуумметра

Диапазон требуемого давления является не единственным фактором при выборе средств измерения. Важную роль играют рабочие условия вакуумметра. Если измерения проводятся в сложных рабочих условиях, т.е. если есть высокий риск загрязнения, вибраций в трубах, возможное воспламенение, тогда средства измерения должны быть прочными и надежными. Для промышленного назначения используют вакуумметры пружинный (Бурдона), диафрагменный, теплопроводный, ионизационный с горячим катодом и Пеннинга. Некоторые из этих средств измерения чувствительны к агрессивным рабочим условиям. Их следует и можно с успехом использовать только если вышеперечисленные источники ошибок по возможности устранены и соблюдаются рабочие инструкции.

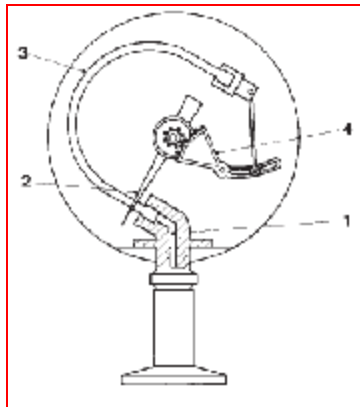


## 3.2 Вакуумметры, показания которых НЕ зависят от рода газа

Механические вакуумметры измеряют давление прямо как силу, с которой частички (молекулы и атомы) в заполненном газом пространстве влияют на поверхность в силу своей тепловой скорости.

### 3.2.1 Пружинный (деформационный) вакуумметр

Внутренняя часть трубки, согнутой в дугу, (так называемая трубка Бурдона 3) подсоединена к откачиваемому объему (рис. 3.2). Под действием внешнего давления воздуха конец трубки отклоняется больше или меньше во время откачки и приводит в действие механизм указателя (4 и 2). Т.к. показания давления зависят от внешнего атмосферного давления, то точность гарантируется при измерениях до 10 мбар, учитывая, что изменения атмосферного давления не корректируются.



1. трубка с фланцем
2. указатель
3. трубка Бурдона
4. система рычага

Рисунок 3.2. Деформационный вакуумметр, сечение

### 3.2.2 Диафрагменный вакуумметр

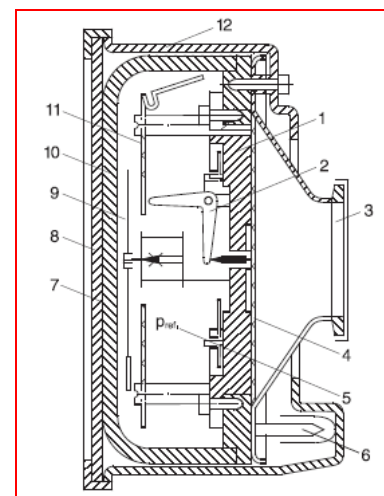
#### 3.2.2.1 Мембранные вакуумметры

Самой известной конструкцией диафрагменного вакуумметра является барометр с анероидной мембраной в качестве измерительной системы. Он содержит герметически запаянную, откачанную емкость, отделенную тонкой мембраной (диафрагмой), изготовленной из сплава медь – бериллий. Т.к. давление падает, мембрана растягивается. Это перемещение передается на указатель через систему рычагов. **Мембранные вакуумметры**, спроектированные по такому принципу,

указывают давление по линейной шкале, независимо от внешнего атмосферного давления.

#### 3.2.2.2 Диафрагменные вакуумметры DIAVAC

Самые точные возможные показания давления требуются ниже 50 мбар. Для таких измерений лучше всего подходят диафрагменные вакуумметры, например, DIAVAC, шкала измерений которого находится в диапазоне 1...100 мбар. Внутреннее пространство датчика, в котором находится система рычагов (2) преобразователя (рис. 3.3) откачено до опорного давления  $p_{ref}$  менее  $10^{-3}$  мбар.



- |                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| 1. основание                  | 8. оргстекло           |
| 2. система рычагов            | 9. указатель           |
| 3. соединительный фланец      | 10. стекло             |
| 4. диафрагма                  | 11. установочная плата |
| 5. опорное давление $p_{ref}$ | 12. корпус             |
| 6. конец отсечки              |                        |
| 7. зеркало                    |                        |

Рисунок 3.3. Сечение диафрагменного вакуумметра DIAVAC

Крышка объема в виде гофрированной диафрагмы (4) изготовлена из специальной стали. Пока объем не откачан, диафрагма зажата между стенками (1). При увеличении откачки, перепад давлений между измеряемым давлением  $p_x$  и опорным  $p_{ref}$  уменьшается.

Сначала диафрагма изгибается слегка, а затем, ниже 10 мбар, сильнее. В вакуумметре DIAVAC отклонение диафрагмы передается на указатель (9). В частности, диапазон измерений 1...20 мбар значительно увеличен, так что давление можно считать достаточно точно (около 0,3 мбар). Чувствительность к вибрациям этого вакуумметра немного выше, чем у мембранного.

### 3.2.2.3 Прецизионные диафрагменные вакуумметры

Значительно большая точность измерений по сравнению с мембранными вакуумметрами и вакуумметрами DIAVAC достигается при использовании прецизионных диафрагменных вакуумметров. Конструкция этих вакуумметров подобна конструкции мембранных вакуумметров. Шкала линейная. Получаемая точность является максимально возможной для современных приборов. Эти приборы выполняют измерения до  $10^{-1}$  мбар при полной шкале в 20 мбар. Большая степень точности приводит к большей чувствительности к вибрациям.

Мембранные вакуумметры точно измеряют давление до 10 мбар (из-за линейной шкалы, их точность снижается на конце шкалы ниже давления). Если измеряется давление ниже 30 мбар, рекомендуется использовать DIAVAC, т.к. его показания (см. выше) значительно более точные. В случае требований повышенной точности измерений необходимо использовать прецизионные диафрагменные вакуумметры. Если необходимо изменить низкое давление с высокой точностью, то необходимо выбрать диапазон давления до 20 мбар. Все механические вакуумметры чувствительны к вибрации. Небольшие вибрации, как, например, при прямом подключении форвакуумного насоса, обычно не определяются.

### 3.2.2.4 Емкостные вакуумметры

Отклонение диафрагмы можно измерить электрически как напряжение или изменение емкости. В прошлом 4 датчика напряжения, которые изменяли свое сопротивление при отклонении диафрагмы, устанавливались на металлическую диафрагму в виде мостовой схемы. Такие приборы производства LEBOLD носили наименование **MEMBRANOVAC**. Позже стали использоваться кремневые диафрагмы, которые содержат 4 «сопротивления напряжению» прямо на поверхности диафрагмы. Электрическая часть так же состояла из мостовой схемы, а постоянный ток подводился на два противоположных угла, тогда как линейный сигнал напряжения, пропорциональный давлению, передавался на два других угла. На рис. 3.4. показана принципиальная схема этих приборов, имеющих название **PIEZOVAC** и широко использующихся. Сегодня отклонение диафрагмы измеряется как изменение емкости плоского конденсатора: один электрод зафиксирован, а другой создается диафрагмой. При отклонении диафрагмы расстояние между электродами и, таким образом, емкость конденсатора, изменяются. На рис. 3.5 показан прин-

цип работы таких вакуумметров. Следует различать преобразователи с металлическими и керамическими диафрагмами. Структура обоих преобразователей идентична и показана на примерах на рис. 3.6. Емкостные диафрагменные вакуумметры используются в диапазоне от атмосферного давления до  $1 \cdot 10^{-3}$  мбар (от  $10^{-4}$  мбар) погрешности измерения быстро возрастают). Чтобы гарантировать достаточное отклонение диафрагмы при столь низком давлении, для различных диапазонов давлений используют диафрагмы различной толщины. В каждом случае давление можно измерить с помощью преобразователя с точностью на три порядка:  $10^{13} \dots 1$ ,  $100 \dots 10^{-1}$ ,  $10 \dots 10^{-2}$ ,  $1 \dots 10^{-3}$  мбар.

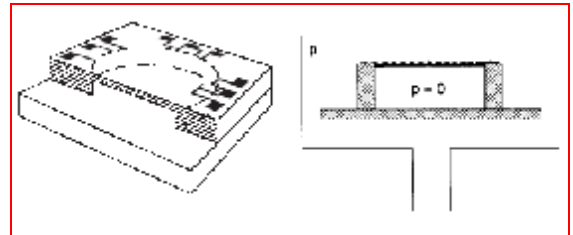


Рисунок 3.4. Пьезоэлектрический преобразователь (базовая диаграмма)

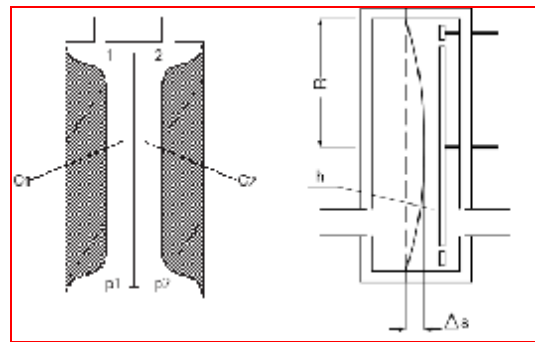


Рисунок 3.5. Емкостной преобразователь (базовая диаграмма)

Если измеряемое давление превышает пределы диапазона, рекомендуется использовать мультисканальную плату (блок) с двумя или тремя преобразователями и возможностью автоматической смены канала. Емкостные диафрагменные вакуумметры подходят для всех целей, где измеряется только абсолютное давление, их показания не зависят от рода газа, а измеряемое давление ниже 1 мбар. На сегодняшний день выпускаются два типа емкостных преобразователей:

- 1) преобразователи DI200 и DI2000 с диафрагмами из оксида алюминия, стойкие к перегрузкам по давлению с вакуумметрами MEMBRANOVAC DM11 и DM12.
- 2) преобразователи CM1, DM10, CM100, CM1000 с диафрагмами из инконеля с очень высоким разрешением с приборами DM21 и DM22.

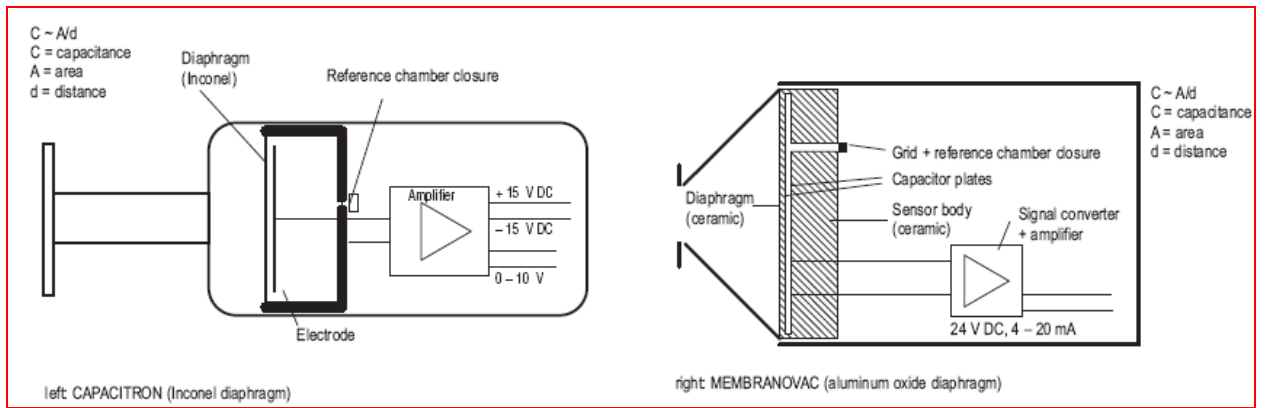


Рисунок 3.6. Емкостные вакуумметры (базовая диаграмма)

### 3.2.3 Ртутные вакуумметры

#### 3.2.3.1 Вакуумметр с U-образной трубкой

Вакуумметр с U-образной трубкой, заполненной ртутью, является простейшим и наиболее точным средством измерения в области низкого вакуума (от 1013 до нескольких мбар). К сожалению их использование в техническом плане ограничивается их размерами и склонностью к разрушению (см. 3.4.1.а).

В откачанной части U-образной трубки поддерживается постоянное давление, равное давлению паров ртути при комнатной температуре (около  $10^{-3}$  мбар). Другая часть трубки подсоединена к объему, в котором измеряется давление. Из перепада уровней двух столбцов можно определить давление по представленной шкале в мбар. Показания не зависят от атмосферного давления.

#### 3.2.3.2 Компрессионный вакуумметр Мак-Леода

Компрессионный вакуумметр, разработанный Мак-Леодом в 1874г, сегодня используется очень редко. Его можно использовать для измерения абсолютного давления в области высокого вакуума до  $10^{-5}$  мбар. Ранее он широко использовался для калибровки вакуумметров, работающих в области среднего и даже высокого вакуума. Однако для точности таких измерений необходимо принять ряд мер предосторожности перед проведением измерений. Давление измеряется путем компрессии количества газа, которое изначально занимает большой объеме в меньшем объеме при поднятии уровня ртути. Измеренное давление, полученное таким образом, можно измерить так же как и в U-образной трубке и рассчитать начальное давление (см. уравнение ниже).

По типу шкалы можно выделить два вида компрессионных вакуумметров: с линейной шкалой (рис. 3.7) и квадратичной шкалой (рис. 3.8). Для компрессионных вакуумметров Мак-Леода с линейной шкалой отношение замкнутого остаточного объема  $V_C$  к общему объему  $V$  должно быть известно для каждого уровня ртути в измерительном капилляре. Это отношение указывается на шкале, поставляемой с прибором. Для компрессионных вакуумметров с квадратичной шкалой необходимо знать общий объем и диаметр капилляра  $d$ .

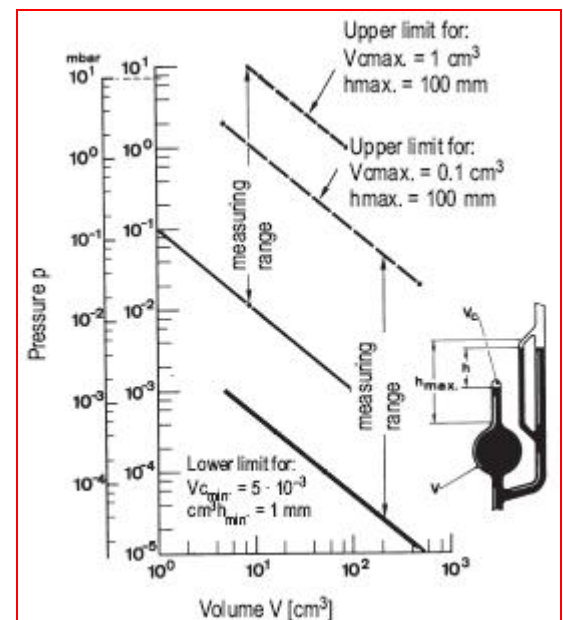


Рисунок 3.7. Компрессионный вакуумметр Мак-Леода с линейной шкалой

Сегодня укороченные компрессионные вакуумметры Мак-Леода согласно Каммереру используются для измерения **окончательного парциального давления** насосов с механической компрессией. Высокая степень компрессии конденсируемых компонентов газа (паров) может привести к конденсации (объем при той же массе меньше примерно в  $10^5$

раз, и им можно пренебречь при измерении), поэтому измеряется только давление компонентов в газовой фазе (получается из основного газового закона).

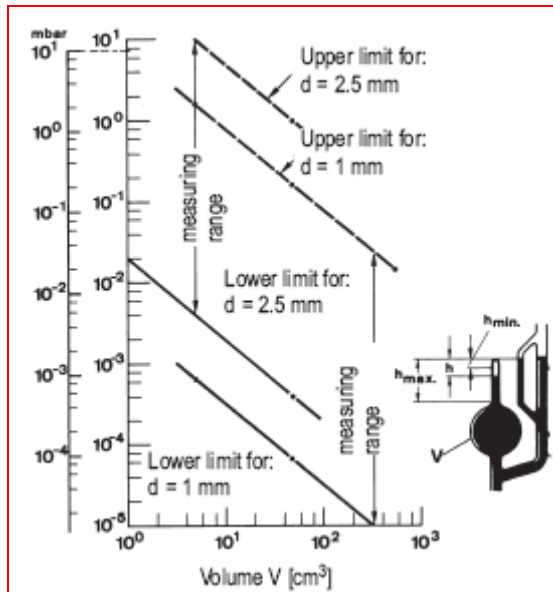


Рисунок 3.8. Компрессионный вакуумметр Мак-Леода с квадратичной шкалой

### Принцип измерения компрессионными вакуумметрами

Если  $h$  – перепад между уровнями ртути в измерительном и опорном капиллярах (мм), тогда из уравнения Бойля – Мариотта получаем:

$$p \cdot V = (p + h) \cdot V_c \quad (3.1)$$

$$p = h \cdot \frac{V_c}{V - V_c} \quad (3.1.a)$$

$p$  – давление, измененное в мм.рт.ст. (торр).

Если  $V_c \ll V$ ,

$$p = h \cdot \frac{V_c}{V} \quad (3.1.b)$$

$V_c$  и  $V$  должны быть известны,  $h$  – показание (линейная шкала).

Отношение остается без изменений, если перепад уровней считывается со шкалы, указанной в мбар, тогда давление получается в мбар:

$$p = \frac{4}{3} \cdot h \cdot \frac{V_c}{V}; \quad h - \text{в мм} \quad (3.1.c)$$

Во время измерения уровень ртути в капилляре измерения всегда устанавливается так, что уровень ртути в опорном капилляре соот-

ветствует верхнему концу измерительного капилляра (рис. 3.7 и 3.8), а объем  $V_c$  всегда равен

$$V_c = h \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad (3.1.d)$$

$h$  – перепад уровней (см. рис. 3.5),

$d$  – внутренний диаметр измерительного капилляра.

Если выражение для объема  $V_c$  подставить в выражение 3.1.b, то получим:

$$p = h^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d^2}{V} \quad (3.1.e)$$

т.е. квадратичную шкалу (торр), если  $V$  и  $d$  указаны в мм<sup>3</sup> и мм. Если шкала нанесена в мбар, тогда:

$$p = h^2 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot \frac{d^2}{V} \quad (3.1.f)$$

где  $h$ ,  $d$  – в мм,  $V$  – в мм<sup>3</sup>.

Компрессионные вакуумметры гарантируют показание суммы всех парциальных давлений газов и конденсацию всех присутствующих паров во время компрессии.

**Диапазон измерения** между верхним и нижним пределами ограничивается максимальным и минимальным отношениями объема капилляра к общему объему (рис. 3.7 и 3.8). **Точность измерения давления** зависит от точности при считывании показаний. При использовании нониуса и зеркал возможно получить точность измерения давления до  $\pm 2\%$ . В диапазоне низких давлений, когда  $h$  мало, нельзя получить большую точность, т.к. геометрическое отклонение имеет значимый эффект рядом с концом капилляра (систематическая ошибка).

Присутствие паров, которые могут сконденсироваться во время компрессии, влияет на измерение неясным образом. Можно легко определить, есть ли пары, давлением которых можно пренебречь. Это можно сделать, установив различные высоты  $h$  в измерительном капилляре при постоянном давлении при использовании линейной шкалы и проведения расчеты по уравнению 3.1.b. Если паров нет, или давлением можно пренебречь, как давлением паров ртути при комнатной температуре, то должно получаться одинаковое значение  $p$  для каждой высоты  $h$ .

Шкалу компрессионного вакуумметра можно рассчитать из геометрических размеров (когда он используется в качестве эталона или поверочного комплекса – уравнение 3.1.а).

### 3.3 Вакуумметры, показания которых зависят от рода газа

Вакуумметры этого типа не измеряют давление непосредственно как силу, действующую на площадь, а косвенно измеряют другие физические переменные, которые пропорциональны количеству частиц и, таким образом, давлению. К вакуумметрам, показания которых зависят от рода газа, относятся: преобразователи отклонений (3.3.1), тепловые (3.3.2), ионизационные (3.3.3) различных конструкций.

Прибор состоит из сенсора (преобразователя, головки) и блока управления, необходимого для его работы. Шкала давления или цифровой дисплей обычно основаны на давлении азота: при измерении действующего давления  $p_T$  газа (пара), показание давление  $p_l$  необходимо умножить на коэффициент, соответствующий действующему газу. Эти коэффициенты различны в зависимости от типа прибора, и приводятся в таблицах как независимые от давления (табл. 3.2) коэффициенты или, если они зависят от давления, то должны определяться на основе графиков (рис. 3.11).

В общем, применимо следующее правило:

Действующее давление  $p_T =$  измеренное давление  $p_l \times$  коэффициент коррекции.

Если давление считывается по шкале азота, но не корректируется, получают эквивалентные азоту значения.

Во всех электрических вакуумметрах (включая вакуумметры с показаниями, зависящими от рода газа) использование компьютеров приводит к отображению давления прямо на дисплее, иными словами, они как бы оказываются вставленными прямо в соответствующие места диаграммы потока. Чтобы иметь возможность использовать большинство стандартизированных компьютерных интерфейсов, так называемые трансмиттеры (преобразователи сигналов со стандартизированным выходным током) встраиваются вместо преобразователей и блоков отображения (т.е. трансмиттеры THERMOVAC, Penning, IONIVAC). Трансмиттеры требуют на-

пряжение питания (+24 В) и выдают зависящий от давления ток, линейный в диапазоне измерения, в диапазоне 4...20 мА или 0...10 В. Показания давления не подаются после подачи этого сигнала компьютеру и его обработки соответствующим программным обеспечением и корректным отображением на дисплее.

#### 3.3.1 Вакуумметр с вращающимся ротором SRG (VISCOVAC)

Трение газа, зависящее от давления, при низких давлениях может использоваться для измерения давления в области среднего и высокого вакуума. В приборах этого типа в качестве измерительного средства используется стальной шарик диаметром несколько миллиметров, подвешенный без контакта в магнитном поле (рис. 3.9). Шарик вращается во вращающемся электромагнитном поле: после достижения стартовой скорости 425 Гц, шарик крутится самостоятельно. Затем скорость падает в зависимости от давления под действием трения, зависящего от давления газа. Давление газа вычисляется по снижению скорости  $f$  согласно уравнению:

$$-f \cdot \frac{df}{dt} = \frac{10}{\pi} \cdot \frac{p \cdot \sigma}{\bar{C} \cdot r \cdot \rho} \quad (3.2)$$

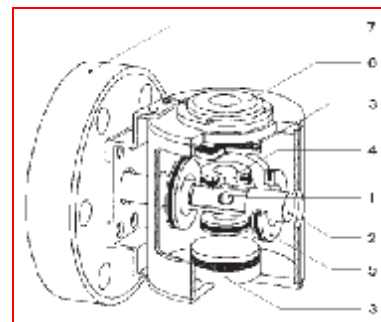
$p$  = давление,

$r$  = радиус шарика,

$\rho$  = плотность материала шарика,

$\bar{C}$  = скорость частиц газа в зависимости от рода газа,

$\sigma$  = коэффициент трения шарика, зависящий от рода газа, около 1.



1. шарик

2. измерительная трубка, закрытая с одного конца, приваренная к соединительному фланцу 7.

3. постоянные магниты

4. обмотка стабилизации

5. обмотки привода

6. уровень

7. соединительный фланец

Рисунок 3.9. Сечение преобразователя VISCOVAC VM212

Поскольку отклонения измерений в 3% достаточно, можно применить  $\sigma = 1$ , так что



чувствительность датчика с вращающимся ротором (SRG) с вращающимся стальным шариком определяется физическими размерами шарика, т.е. произведением радиуса  $r$  на плотность  $r \times \rho$  (ур. 3.2). Т.к. шарик калиброван, такое устройство подходит в качестве передачи стандарта, т.е. как опорное устройство для калибровки другого вакуумметра путем сравнения и характеризуется высокой стабильностью. Измерения с помощью VISCOVAC не ограничиваются давлением. Можно измерить другие переменные согласно кинетической теории газов: длину свободного пути, время образования монослоя, количество частиц, скорость соударений. Прибор позволяет сохранить 10 программ и легко переключается между программами. Время измерения при срабатывании замедления составляет от 5 до 40 сек при низком давлении. Порядок измерений управляется автоматически с помощью микропроцессора, поэтому новое значение отображается после каждого измерения (процедура замедления). Программа позволяет вычислить некоторые статистические параметры (среднее арифметическое, стандартное отклонение) после заранее указанного количества измерений.

Счетчик частиц VISCOVAC прямо реализует представляет принцип измерения (частица передает импульс на замедляющийся шарик). При других электрических принципах измерения, которые зависят от рода газа, количество частиц измеряется преобразователем косвенно через количество потерь тепла через частицы (тепловой) или количество образованных ионов (ионизационный).

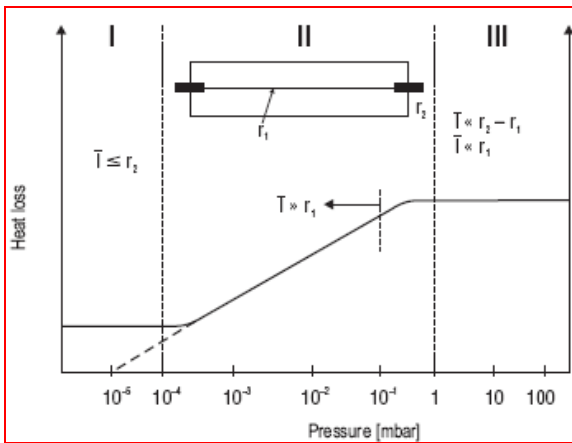
### 3.3.2 Тепловые вакуумметры

Из молекулярно-кинетической теории известно, что теплопроводность статических газов не зависит от давления при высоких давлениях (количестве частиц),  $p > 1$  мбар. При низких давлениях,  $p < 1$  мбар, теплопроводность зависит от давления (примерно пропорциональна  $1/\sqrt{M}$ ). Она снижается в области среднего вакуума, начинающегося примерно с 1 мбар, пропорционально давлению и достигает нуля в области высокого вакуума. Эта зависимость от давления используется в тепловых вакуумметрах и позволяет проводить точные измерения давления в области среднего вакуума (в зависимости от рода газа).

Наиболее широко распространен вакуумметр Пирани. Катод с радиусом  $r_1$ , нагретый примерно до 100...150°C (рис. 3.10) выделяет

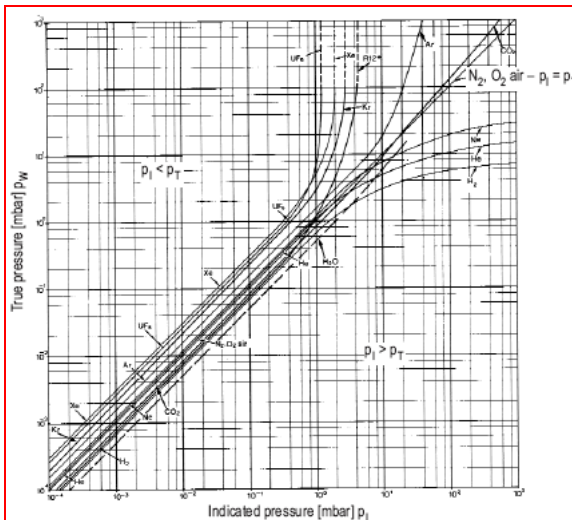
тепло в окружающий газ через излучение и теплопроводность (и передается через концы катода). В области низкого вакуума теплопроводность через конвекцию газа виртуально не зависит от давления (рис. 3.10). Если при давлении в несколько мбар длина свободного пути газа того же порядка, что и диаметр катода, этот тип теплопереноса снижается все больше и больше, становясь зависимым от плотности и давления. Ниже  $10^{-3}$  мбар длина свободного пути газа превосходит радиус  $r_2$  измерительной трубки. Считывающий катод в преобразователе образует ответвление моста сопротивления. В ранее использовавшихся **теплопроводных вакуумметрах с переменным сопротивлением** THERMOTRON считывающий катод нагревался постоянным катодом. При повышении давления газа температура катода понижается из-за большей теплопроводности газа, и мост становится разбалансированным. Ток моста является результатом измерения давления, что отражается через шкалу измерения. В **теплопроводных вакуумметрах с постоянным сопротивлением** THERMOVAC, которые выпускаются сейчас, считывающий катод так же входит в состав моста сопротивления. Нагревающее напряжение, прикладываемое к мосту, регулируется так, что сопротивление и температура остаются постоянными несмотря на потери тепла. Т.е. мост всегда сбалансирован. Этот режим регулирования содержит постоянную времени, равную нескольким миллисекундам, и ответ на изменение давления приходит быстрее по сравнению с приборами с переменным сопротивлением. Напряжение, прикладываемое к мосту является мерой давления. Измеренное напряжение корректируется электронным образом так, чтобы получить значение по логарифмической шкале в диапазоне измерения. Диапазон измерения теплопроводных вакуумметров с постоянным сопротивлением равен  $10^{-4}$ ...1013 мбар. Из-за короткого времени отклика они хорошо подходят для систем управления и мониторинга давления (раздел 3.5). Погрешность измерений варьируется для различных диапазонов давления. Максимальная ошибка при отклонении на всей шкале около 1-2%. В самом чувствительном диапазоне ( $10^{-3}$ ...1 мбар) составляет около 10% от показания давления. Погрешность измерений вне этого диапазона значительно больше.





I рассеяние тепла в результате излучения и проводимости на концах,  
 II рассеяние тепла в результате проводимости в зависимости от давления,  
 III рассеяние тепла в результате излучения и конвекции  
**Рисунок 3.10. Зависимость количества тепла, выделяемого нагретым катодом (радиус  $r_1$ ) в трубке ( $r_2$ ) при постоянном перепаде температур в зависимости от давления**

Как и во всех вакуумметрах, зависящих от рода газа, шкала прибора и цифровой дисплей для тепловых вакуумметров проградуированы по воздуху или азоту. Внутри пределов ошибки показания давления газов с примерно такими же массами ( $O_2$ ,  $CO_2$  и др.) можно считать сразу. Калибровочные кривые для нескольких газов представлены на рис. 3.11.



**Рисунок 3.11. Калибровочные кривые вакуумметра THERMOVAC для различных газов относительно азота**

Пример сильного различия между действующим давлением  $p_T$  и показанием давления  $p_i$  при измерении давления получается при напуске воздуха в вакуумную систему, заполненную аргоном из баллона под давлением во избежание повышения влажности. Согласно

рис. 3.11 можно получить показание  $p_i$  только 40 мбар при достижении атмосферного давления  $p_T$  с помощью THERMOVAC. Аргон необходимо удалить из системы. Для таких ситуаций необходимо использовать вакуумметр, показания которого не зависят от рода газа (см. ур. 3.2).

### 3.3.3 Ионизационные вакуумметры

Ионизационные вакуумметры являются важными средствами измерения в областях высокого и сверхвысокого вакуума. Они измеряют давление исходя из количества частиц (плотности), что пропорционально давлению. Газ, давление которого измеряется, входит в преобразователь и частично ионизируется с помощью электрического поля. Ионизация происходит тогда, когда электроны ускоряются в электрическом поле и передают достаточное количество энергии для формирования положительных ионов при соударении с молекулами газа. Эти ионы передают свой заряд на измерительный электрод (коллектор ионов) системы. Создаваемый таким образом ионный ток является мерой давления, т.к. выход ионов пропорционален количеству частиц и, следовательно, давлению.

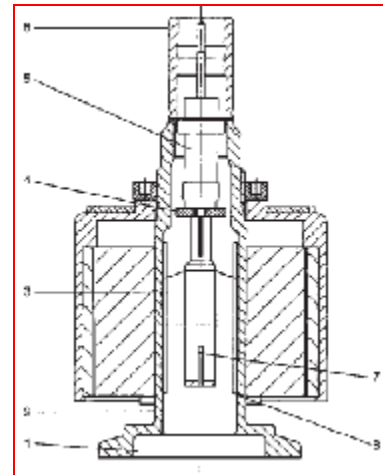
Образование ионов происходит или при разряде электрического поля высокой напряженности (холодный катод или разряд Пеннинга, 3.3.3.1) или при соударении с электронами, испускаемыми горячим катодом (3.3.3.2).

При прочих равных условиях выход ионов и, следовательно, ионный ток зависят от рода газа, т.к. некоторые газы легче ионизируются, чем другие. Как и во всех вакуумметрах, показания которых зависят от рода газа, ионизационные вакуумметры откалиброваны по азоту в качестве опорного газа (см. 3.3). Чтобы получить действующее давление, газа, отличного от азота, показание давления необходимо умножить на корректирующий коэффициент из табл. 3.2. Коэффициенты, указанные в табл. 3.2. считаются независимыми от давления, хотя они зависят от геометрии системы электродов. Поэтому здесь приведены средние значения для различных типов ионизационных вакуумметров (см. рис. 3.16).

#### 3.3.3.1 Ионизационный вакуумметр с холодным катодом (Пеннинга)

Ионизационный вакуумметр, который работает с холодным разрядом называется вакуумметром с холодным катодом или вакуумметром Пеннинга. Процесс разряда в изме-

рительной трубке в принципе такой же, как и в магниторазрядном насосе (раздел 2.1.8.3). Общей чертой всех типов вакуумметров с холодными катодами является то, что они содержат только два не нагреваемых электрода, катод и анод, между которыми создается так называемый холодный разряд и поддерживается с помощью напряжения постоянного тока (около 2 кВ), так что разряд существует при очень низком давлении. Это достигается за счет использования магнитного поля, действующего так, чтобы электроны двигались внутри разряда достаточно долго. При этом скорость их соударения с молекулами газа была достаточно большой для формирования необходимой для поддержания разряда количества ионов. Магнитное поле (рис. 3.12) расположено так, чтобы его линии пересекались с линиями электрического поля. В этом случае электроны совершают движение по спирали. Положительные и отрицательные заряды, созданные при соударении, двигаются к соответствующим электродам и создают зависящий от давления ток разряда, которой и измеряет прибор. Показания в мбар зависят от рода газа. Верхний предел диапазона измерений определяется тем, что выше уровня  $10^{-2}$  мбар разряд Пеннинга заменяется на тлеющий разряд с интенсивным свечением, что не подходит для измерения давления. Во всех вакуумметрах Пеннинга сорбция газа выше, чем в вакуумметрах с горячим катодом. Измерительная трубка Пеннинга откачивает газ так же как и магниторазрядный насос ( $S \approx 10^{-2}$  л/с). Здесь снова ионы, созданные в разряде, ускоряются по направлению катода, где они частично удерживаются и вызывают частичное распыление материала катода. Распыляемый материал катода формирует пленку геттерного материала на стенках трубки вакуумметра. Несмотря на эти недостатки, которые приводят к высокой погрешности в показаниях давления (до 50%) вакуумметры с холодным катодом имеют три больших достоинства. Во-первых, это дешевые средства измерения высокого вакуума. Во-вторых, измерительная система не чувствительна к случайному напуску воздуха и вибрациям, и в-третьих, с прибором легко работать.



- |   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. хомутовый<br>фланец DN25KF,<br>DN40KF    | 4. керамическая<br>шайба   |
| 2. корпус                                   | 5. токоввод                |
| 3. анодное кольцо<br>с контактом<br>поджига | 6. соединительная<br>штука |
|   | 7. контакт анода           |
|   | 8. катодная плата          |

Рисунок 3.12. Вакуумметр PENNINGVAC PR35, разрез

### 3.3.3.2 Ионизационный вакуумметр с горячим катодом

В основном, измерительная система таких вакуумметров состоит из трех электродов (катода, анода и коллектора ионов), где катод горячий. Используемые катоды изготавливают из вольфрама, а сейчас изготавливают из материала ( $\text{Th}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), покрытого оксидом иридия, чтобы снизить работу выхода электронов и сделать катоды более стойкими к окислению. Ионизационные вакуумметры этого типа работают с низкими напряжениями без внешних магнитных полей. Горячий катод испускает большое количество электронов. Электроны ускоряются в электрическом поле (рис. 3.13) и получают достаточно энергии от поля для ионизации газа, в котором находится система электродов. Созданные положительные ионы направляются к коллектору ионов, который является отрицательным относительно катода и отдают там свой заряд. Создаваемый ионный ток является мерой количества частиц и, следовательно, давления газа. Если  $i^-$  - ток электронов, испускаемых горячим катодом, пропорциональный давлению ток  $i^+$ , создаваемый в системе измерения определяется как:

$$i^+ = C \cdot i^- \cdot p \quad \text{и} \quad (3.3)$$

$$p = \frac{i^+}{i^- \cdot C} \quad (3.3.a)$$

Переменная  $C$  является постоянной системы измерения вакуумметра.

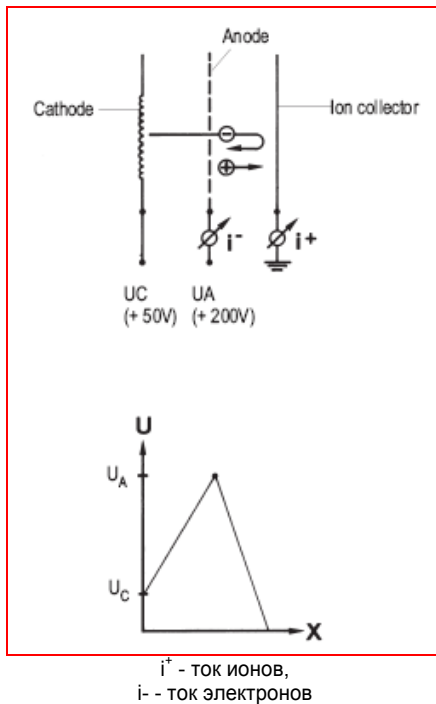


Рисунок 3.13. Схема и кривая потенциала вакуумметра с горячим катодом

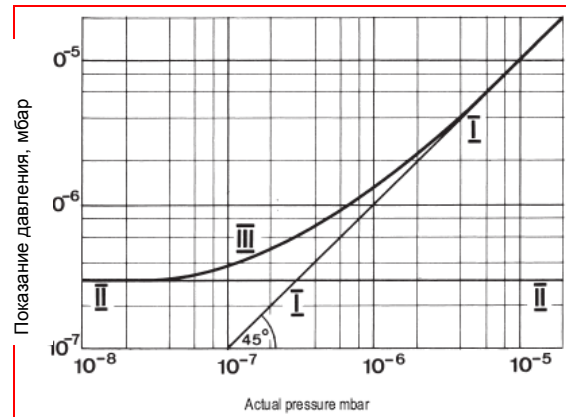
Для азота эта переменная составляет около 10 1/мбар. При постоянном токе электронов чувствительность  $S$  преобразователя определяется как отношение ионного тока и давления. Для тока 1 мА и  $C = 10 \text{ мбар}^{-1}$ , чувствительность преобразователя будет:

$$S = \frac{i^+}{p} = C \cdot i^- = 10 \text{ мбар}^{-1} \cdot 10^{-3} \text{ А} = 1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{А}}{\text{мбар}}$$

Ионизационные вакуумметры с горячим катодом так же осуществляют сорбцию газа (действие откачки), которое, однако, значительно меньше по сравнению с системой Пеннинга, т.е. примерно  $10^{-3}$  л/с. В основном сорбция газа происходит на стеклянных стенках преобразователя и немного на коллекторе ионов. Здесь разумно использовать открытый преобразователь, с которым легче работать, т.к. не нужно сильных магнитных полей. Верхний предел измерений вакуумметра с горячим катодом составляет около  $10^{-2}$  мбар (с учетом особенностей конструкции). В основном определяется процессом рассеивания ионов в молекулах газа из-за короткой длины свободного пути при высоких давлениях (ионы не достигают коллектора ионов, т.е. низкий ионный ток). Более того, при высоком давлении могут образоваться неуправляемый тлеющий или дуговой разряд и электростатические разряды в

стеклянной трубке. В этом случае показание давления  $p_1$  может сильно отличаться от действующего давления  $p_T$ .

При низком давлении диапазон измерения ограничивается двумя эффектами: эффектом рентгеновского излучения и эффектом десорбции ионов. Эти эффекты приводят к потере строгой пропорциональности между давлением и ионным током и определяют нижний предел измерений (см. рис. 3.14).



I-показание давления без рентгеновского излучения, II- предел нижнего давления из-за эффекта рентгеновского излучения, III-зависимость  $p_1$  от  $p_T$ .

Рисунок 3.14. Предел нижнего давления из-за эффекта рентгеновского излучения в обычном ионизационном вакуумметре

### Эффект рентгеновского излучения (рис 3.15)

Электроны, выходящие из катода при соударении с анодом приводят к выходу фотонов (мягкое рентгеновское излучение). Эти фотоны, в свою очередь, инициируют фотоэлектроны из поверхности, о которую они ударяются. Фотоэлектроны, выпущенные из коллектора ионов, следуют к аноду, т.к. коллектор ионов создает электронный ток, который неотделим от положительного ионного тока, следующего к коллектору ионов. Этот фототок моделирует давление. Подобный эффект называют положительным эффектом рентгеновского излучения, которое зависит от напряжения анода и размера поверхности коллектора.

В некоторых условиях бывает и отрицательный эффект рентгеновского излучения. Фотоны, которые ударяются о стенки, окружающие преобразователь, создают выход фотоэлектронов, которые снова направляются к аноду, и, т.к. анод имеет структуру сетки, они попадают в пространство внутри анода. Если окружающие преобразователь стенки имеют такой же потенциал, что и коллектор ионов, т.е. потенциал заземления, то часть электронов может достичь коллектор ионов. Это приводит к потоку электронного тока к коллектору ионов,

который может компенсировать ионный ток. Эффект отрицательного рентгеновского излучения зависит от потенциала стенок преобразователя.

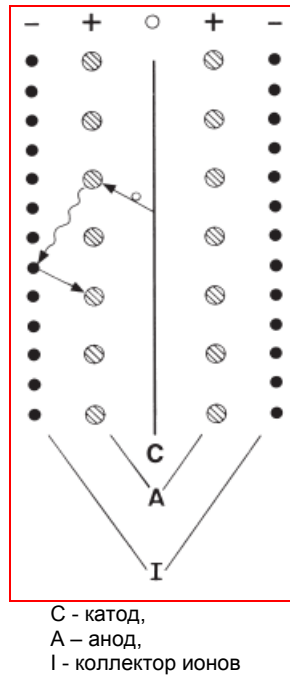


Рисунок 3.15. Объяснение рентгеновского излучения в ионизационном вакуумметре.

Электроны  $e^-$ , выпущенные катодом С ударяются об анод А и образуют мягкое рентгеновское излучение. Радиация в основном образуется в области коллектора ионов и образует там фотоэлектроны  $e^-$

### Эффект десорбции ионов

Адсорбированные газы могут покидать поверхность при электронном ударе. Для ионизационных вакуумметров это означает, что, если на аноде есть слой адсорбированных газов, эти газы могут частично десорбироваться в качестве ионов при электронном ударе. Ионы достигают коллектора ионов, и приводят к индикации давления, которая вначале не зависит от давления, но повышается с увеличением тока электронов. Если используется такой малый электронный ток, что количество электронов, столкнувшихся с этой поверхностью, меньше количества адсорбированных молекул газа, каждый электрон будет десорбировать положительный ион. Если затем электронный ток увеличится, десорбция увеличится тоже, т.к. большее количество электронов ударится о поверхность. В итоге это приведет к снижению количества адсорбированных частиц на поверхности. Показания упадут и могут достигнуть значений, которые могут быть значительно ниже, чем показания при маленьком электронном токе. Из-за этого эффекта необходимо выяснить влияние тока десорбции на показания давления. Это можно сделать достаточно

просто, изменив электронный ток в 10 или 100 раз. Показания для большего электронного тока являются более точными значениями давления.

В дополнение к ионизационным вакуумметрам, в структуре которых имеется общий триод, существуют различные ионизационные системы вакуумметров (системы Баярд-Альперт, Баярд-Альтепр с модулятором, системы с экстрактором), которые в большей или меньшей степени подавляют влияние вышеописанных эффектов и поэтому они используются для измерений в областях высокого и сверхвысокого вакуума. Сегодня система Баярд-Альперт используется в качестве стандартной.

### а) конвекционные ионизационные вакуумметры

Триод конвекционной конструкции (рис. 3.16.а) используется в качестве преобразователя, который слегка модифицирован, так что внешний электрод работает как коллектор ионов, а сетка внутри него – как анод. При таком расположении электроны ускоряются так, чтобы их путь был длиннее (соударения вокруг проводов сетки и анода). При этом вероятность ионизирующих соударений и, следовательно, чувствительность датчика, становится выше. Т.к. система триодов в основном может использоваться только в высоком вакууме из-за сильного рентгеновского излучения, эффект сорбции (откачки) газов, происходящий в системе электродов незначительно влияет на измерения давления.

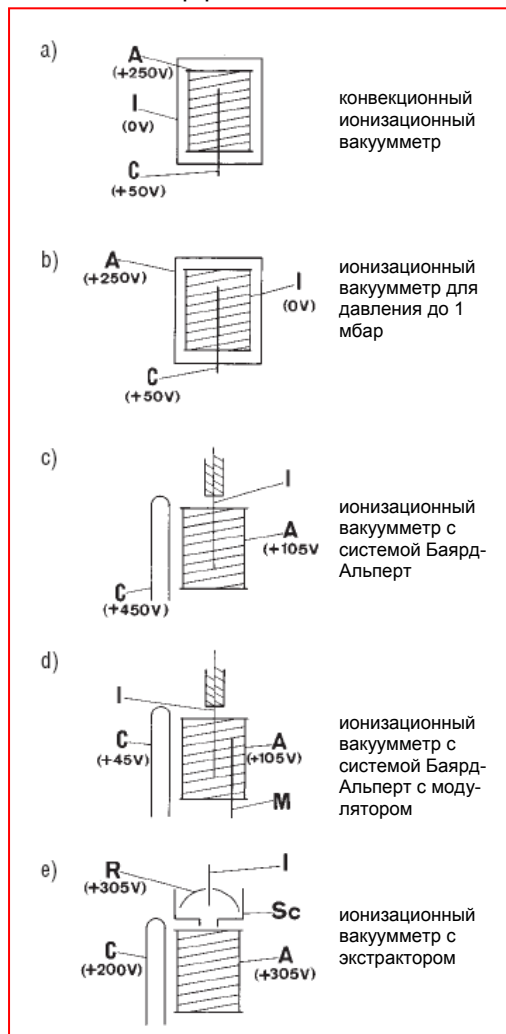
### б) ионизационные вакуумметры для давления до 1 мбар

Снова используется триод в качестве электрода (рис. 3.16.б) с не модифицированной конструкцией. Т.к. датчик предназначен для измерения давления до 1 мбар, то катод должен выдерживать высокое давление кислорода. Поэтому он разработан как так называемый несгораемый катод, состоящий из иридия, покрытого иттрием. Чтобы достичь прямолинейной характеристики (ионный ток как линейная функция давления) до 1 мбар, в контур анода устанавливается высокоомный резистор.

### с) ионизационные вакуумметры с системой Баярд-Альперт (стандартная система на сегодня)

Чтобы гарантировать линейность между ионным током и давлением на максимально возможном диапазоне давления, необходимо максимально подавить рентгеновское излучение. В системе электродов Баярда-Альперта это достигается за счет того, что горячий катод располагается вне анода, а коллектор ионов из тонкой проволоки фор-

мирует ось системы электродов (рис. 3.16.с). Рентгеновское излучение снижается на 2 – 3 порядка из-за сильного уменьшения площади поверхности коллектора ионов. При измерении давления в области сверхвысокого вакуума, внутренняя поверхность преобразователя и подсоединение к камере влияют на показания давления. Различные процессы адсорбции, десорбции, диссоциации и феномены потока в этом контексте рассматриваются. При использовании системы Баярд-Альперта в качестве открытого вакуумметра, размещенного прямо в камере, можно избежать ошибок в измерении в силу перечисленных выше эффектов.



C – катод,  
A – анод,  
R – рефлектор,  
I – коллектор ионов,  
Sc – экран,  
M – модулятор

Рисунок 3.16. Схемы электродов в различных ионизационных вакуумметрах

**d) ионизационные вакуумметры с системой Баярд-Альперт с модулятором**

Система Баярд-Альперта с модулятором (рис. 3.16d), предложенная Редхедом, позволяет выполнить измерения давления, при

которых ошибки из-за влияния рентгеновского излучения и десорбции ионов можно оценить количественно. В этой системе второй тонкий провод, модулятор, располагается рядом с анодом в дополнение к коллектору ионов внутри анода. Если на этот модулятор подать потенциал анода, то это не повлияет на измерения. С другой стороны, одинаковый потенциал, приложенный к модулятору и коллектору ионов, приведет к тому, что часть сформированного ионного тока потечет через модулятор, и ток на коллекторе станет меньше. Показание давления  $p_I$  ионизационного вакуумметра с модулятором, установленным на потенциал анода, включает часть давления газа  $p_g$  создаваемого рентгеновским излучением  $p_g$ :

$$p_A = p_g + p_\gamma \quad (3.4)$$

После переключения модулятора от потенциала анода на потенциал коллектора ионов, показание давления модулятора  $p_M$  будет ниже показания  $p_I$ , т.к. часть ионов теперь достигает модулятора:

$$p_M = \alpha \cdot p_g + p_\gamma \quad (3.5)$$

где  $\alpha < 1$ .

Доля давления, связанного с рентгеновским излучением, будет одинаковой в обоих случаях. Поле определения разницы в показаниях давления, можно вычислить давление газа  $p_g$ :

$$p_g = \frac{p_A - p_M}{1 - \alpha} \quad (3.6)$$

Коэффициент  $\alpha$  можно сразу определить в ходе эксперимента при более высоком давлении (около  $10^{-6}$  мбар), при котором можно пренебречь рентгеновским излучением и давлением  $p_\gamma$ . Считывается давление соответствующее двум потенциалам модулятора и образуется отношение. Этот метод имеет дополнительное преимущество в том, что определяется эффект десорбции ионов. Допускается измерение давлений до  $10^{-11}$  мбар с относительно маленькими затратами.

**e) ионизационный вакуумметр с экстрактором**

Мешающие эффекты, которые влияют на измерение давления, можно так же устранить с помощью ионно-оптической системы, впер-

вые предложенной Редхедом. С помощью этой системы экстрактора (рис. 3.16.е) ионы из цилиндра анода фокусируются на очень тонкий и короткий коллектор ионов. Коллектор ионов установлен так, что задняя стенка формирует чашеобразный электрод, на котором поддерживается потенциал анода и ионы не могут покинуть это пространство. Из-за геометрии системы и потенциалов отдельных электродов вредное влияние рентгеновского излучения и десорбции ионов почти полностью исключено без использования модулятора. Системы с экстрактором измеряют давление в диапазоне  $10^{-4} \dots 10^{-12}$  мбар. Другим достоинством этой системы является ее размер: открытый датчик диаметром всего 35 мм можно монтировать в маленькие системы.

### 3.4 Настройка и калибровка, национальные стандарты DKD и PTB

Определение терминов: т.к. эти термины часто путают при ежедневном использовании, то сначала следует внести ясность в определения.

Под **Настройкой** понимается корректная установка и настройка прибора. Например, установка 0...100% в вакуумметрах THERMO-VAC или установка масс-спектрометра на массу 4 гелиевом течеискателе.

**Поверка** – сравнение (компарирование) со стандартом с определенной регулярностью, выполняемое квалифицированным персоналом (Бюро стандартов). Если итог регулярной проверки положительный, то прибором можно пользоваться в течение следующего рабочего периода (например, еще три года), а срок очередной поверки указывается на табличке на приборе. Если итог проверки отрицательный, прибор изымается из работы.

**Калибровка** соответствует сравнению со стандартом с определенной регулярностью, выполняемому квалифицированным персоналом (возможность калибровки). Результатом проведения этой процедуры является получение калибровочного сертификата, в котором содержатся отклонения показаний прибора, калиброванного по определенному стандарту.

Калибровку выполняют в ходе калибровочных работ. Поднимается вопрос о достаточности стандартов, по которым проводится калибровка. Возможностями калибровки обладает **Немецкий центр калибровки DKD** под управлением Федерального Физико-Технического института PTB. Его функцией

является обеспечение гарантий, что измерительное и испытательное оборудование, используемое в промышленности для измерений, обеспечивает официальные стандарты. Калибровка вакуумметров и течеискателей в рамках DKD осуществляется компанией LEYBOLD и другими с помощью PTB. Требуемая калибровка параметров насосов выполняется в соответствии с DIN 28 418 (табл. 11.1) и проверяется PTB. Возможности калибровки DKD, так называемая **передача стандартов** (эталонных вакуумметров), выполняется PTB с определенной регулярностью. Все вакуумметры калибруются LEYBOLD в Кельне по просьбе потребителя. Выдается калибровочный (поверочный) сертификат DKD со всеми данными и параметрами калибровки (поверки). Стандарты Федерального Физико-технического института называются **национальными стандартами**. Чтобы гарантировать адекватную точность измерений или минимальную погрешность измерений при калибровке PTB проводит измерения через **применение основных методов**. Это означает, например, описание давления через силу, действующую на площадь, или плотность газа согласно законам физики. Поверки стандартных (эталонных) приборов проводятся раз в год для калибровки более высокого уровня, что является еще одной функцией PTB, называемой поддержанием национального стандарта. В других странах национальные институты используют аналогичные методы для поддержания стандартов. На рис. 3.17 представлена шкала давлений применяемая в PTB, Германия. Рекомендации для проведения калибровок и поверок указаны в стандарте DIN 28 416 и ISO.

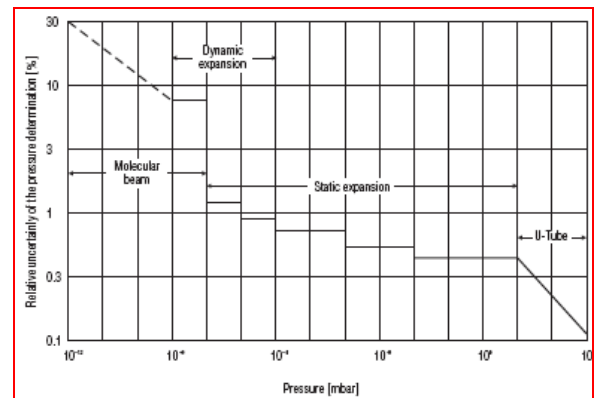


Рисунок 3.17. Шкала давлений Федерального Физико-технического института (Берлин) для инертных газов, азота и метана

#### 3.4.1 Примеры основных методов измерения давления (в качестве стандартных ме-

## тодов для калибровки вакуумметров)

### а) Измерения давлений с эталонным вакуумметром

Примером такого вакуумметра является U-образный вакуумметр, в котором измерение давления в измерительном капилляре основано на измерении веса столба ртути. Ранее при калибровке использовался вакуумметр Мак-Леода. С помощью прецизионного вакуумметра Мак-Леода и точно проведенных измерений с учетом всех возможных источников ошибок можно измерить давление ниже  $10^{-4}$  мбар с высокой точностью.

Другим эталонным вакуумметром является вакуумметр VISCOVAC с вращающимся шариком (раздел 3.3.1) и емкостные диафрагменные вакуумметры (раздел 3.2.2.4)

### б) Измерение известного давления, метод статического расширения

На основе некоторого количества газа, параметры которого ( $p$ ,  $T$ ,  $V$ ) точно известны –  $p$  лежит в диапазоне измерения эталонного вакуумметра, такого как U-образный вакуумметр или вакуумметр Мак-Леода, ниже давление рабочего диапазона ионизационного давления можно получить через несколько ступеней расширения.

Если газ, содержащийся в объеме  $V_1$  расширяется до объема  $(V_1 + V_2)$  и из  $V_2$  до  $(V_2 + V_3)$ , и т.д., через несколько ступеней можно получить:

$$p_n = p_1 \cdot \frac{V_1}{V_1 + V_2} \cdot \frac{V_2}{V_2 + V_3} \cdot \dots \cdot \frac{V_{n-1}}{V_{n-1} + V_n} \quad (3.7)$$

$p_1$  = начальное давление, измеренное прямо в мбар,  $p_n$  = калибровочное давление.

В этом методе необходимо измерить объем как можно точнее (рис. 3.18) и поддерживать постоянную температуру. Для этого метода необходимо поддерживать систему чистой и ограничиться предельным давлением, при котором количество газа может измениться за счет эффектов адсорбции, десорбции вне допустимых пределов ошибок. Согласно экспериментальным данным нижний предел давления составляет  $5 \cdot 10^{-7}$  мбар. Этот метод называется методом статического расширения, т.к. давление и объем являются определяемыми переменными.

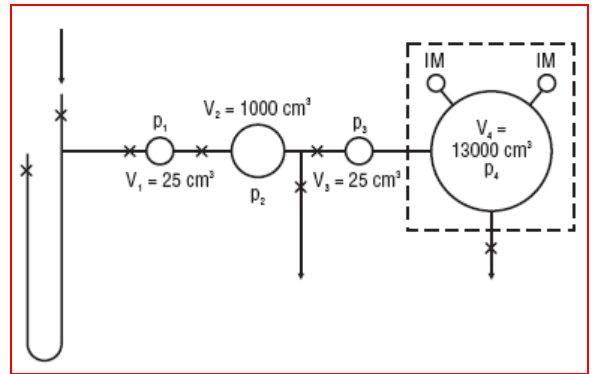


Рисунок 3.18. Создание низкого объема через статическое расширение

### в) метод динамического расширения (рис.3.19)

Согласно этому методу давление калибровки  $p$  создается за счет напуска газа при постоянном потоке  $Q$  в вакуумную камеру при постоянной откачке камеры насосом с постоянной быстротой действия  $S$ . В состоянии равновесия из 1.10а получаем:

$$p = \frac{Q}{S}$$

$Q$  получается из количества газа, протекающего в калибровочную камеру из баллона под постоянным давлением или из количества газа, втекающего в камеру при измеренном давлении через отверстие известной проводимости. Давление перед входным клапаном должно быть таким, чтобы его можно было измерить эталонным вакуумметром. Входное отверстие клапана (маленького капилляра, фильтра) должно быть таким чтобы обеспечить условие  $d \ll \lambda$ , т.е. чтобы обеспечить молекулярный режим течения и постоянство проводимости клапана (см. раздел 1.5). Количество газа определяется как  $p_1 \cdot L_1$ , где  $p_1$  = давление перед входным клапаном,  $L_1$  = проводимость клапана. Система откачки содержит прецизионное отверстие в стенке проводимости  $L_2$  и насос с быстротой действия  $S_p$ :

$$S = \frac{L_2 \cdot S_p}{L_2 + S_p} = \frac{L_2}{1 + \frac{L_2}{S_p}} \quad (3.8)$$

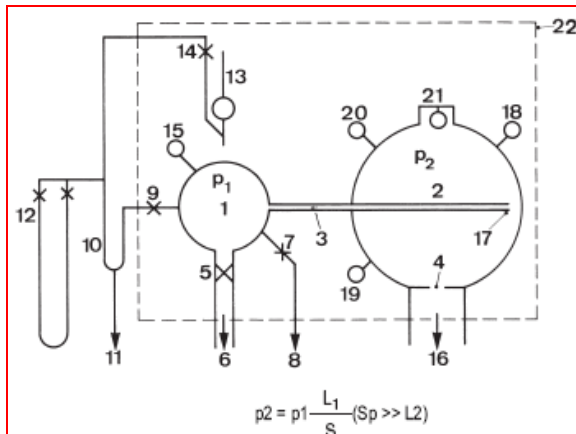
и поэтому

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{L_1}{S} = p_1 \cdot \frac{L_1}{L_2} \cdot \left( 1 + \frac{L_2}{S_p} \right) \quad (3.9)$$

К достоинствам этого метода можно отнести то, что после наступления равновесия сорб-



ционные эффекты можно игнорировать, и поэтому этот метод используют для калибровки вакуумметров для очень низких давлений.



- |   |  |
|---|--|
| 1. объем 1                              | 13. вакуумметр                           |
| 2. объем 2                              | Мак-Леода                                |
| 3. входной клапан (проводимость $L_1$ ) | 14. клапан                               |
| 4. отверстие                            | 15. калибруемый ионизационный вакуумметр |
| 5. клапан                               | 16. к насосу ( $S_p$ )                   |
| 6. к системе откачки                    | 17. подача газа                          |
| 7. клапан                               | 18. масс-спектрометр                     |
| 8. к баллону с газом                    | 19, 20 калибруемые вакуумметры           |
| 9. клапан                               | 21 калибруемый открытый датчик           |
| 10. ловушка $LN_2$                      | 22. прогреваемая часть                   |
| 11. к системе откачке                   |  |
| 12. Г-образный вакуумметр               |  |

Рисунок 3.19. схема системы для калибровки по методу динамического расширения

## 3.5 Измерение, регулировка и управление давлением в вакуумных системах

### 3.5.1 Основы измерения давления и управления

Во всех вакуумных процессах давление в системе необходимо постоянно проверять и при необходимости регулировать. Современные средства управления требуют, чтобы все измеряемые значения, которые важны для мониторинга, передавались на центральный пост управления, где хранятся. Изменения давления часто переписываются с помощью записывающего оборудования. Это предъявляет дополнительные требования к вакуумметрам:

- 1) длительную индикацию измеренного значения (аналоговую и цифровую)
- 2) легкость считывания измеренного значения
- 3) запись выходного сигнала на приборе для записи, управления /регулирования
- 4) встраиваемый интерфейс (RS232 и т.п.)

5) возможность переключения через встроенные точки переключения.

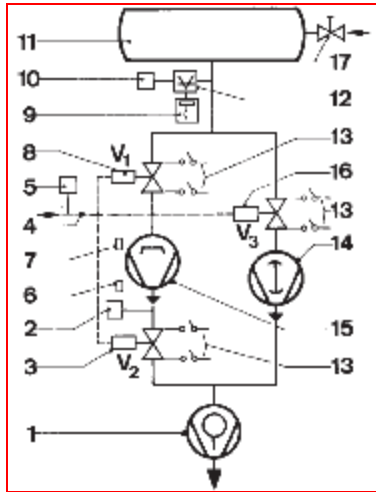
Все вакуумметры, имеющие цифровой дисплей, соответствуют этим требованиям, за исключением вакуумметров Бурдона, прецизионных диафрагменных и ртутных. Соответствующие блоки управления имеют возможность записи выходных сигналов, питания которых подается в диапазоне 0...10 В постоянного тока, в зависимости от показаний давления на шкале прибора, так что значения давления могут записываться по времени записывающим устройством. Если переключатель давления подсоединен к устройству записи выходного сигнала давления, то переключатель может сработать, когда значение будет выше или ниже указанного значения блокировки. Эта блокировка или пороговое значение для переключения работы напрямую из датчика называется значением срабатывания. Кроме вакуумметров, существуют диафрагменные переключатели давления, которые срабатывают (переключают режим работы) без отображения значения через усилитель при достижении указанного давления. Клапанами, например, тоже можно управлять через подобное переключение режимов.

### 3.5.2 Автоматическая защита, измерение и управление вакуумных систем

Защита вакуумных систем от неисправностей очень важна. В случае неисправности материалы могут подвергнуться риску утечек в системе или потерь из-за утечек технологических компонентов или во время откачки. Поэтому необходимо обеспечить адекватное управление работой и защиту, особенно для больших технологических систем. Следует учитывать отдельные факторы. Рассмотрим пример, приведенный на рис. 3.20, где показана высоковакуумная система. Камеру 11 можно откачать с помощью насоса Рутса 14 или диффузионного насоса 15, или обоими насосами вместе с форвакуумным насосом 1. Насос Рутса используется в области среднего вакуума, а диффузионный – в области высокого вакуума. Клапаны 3, 8, 16 имеют электропневматическое управление. отдельные компоненты приводятся в действие с передней панели с помощью кнопок управления. Система откачки имеет защиту от следующих видов неисправностей:

- 1) отключения питания
- 2) падения давления в системе подачи сжатого воздуха
- 3) сбоев в системе водяного охлаждения диффузионного насоса

- 4) сбоя в системе нагрева диффузионного насоса
- 5) неисправности форвакуумного насоса
- 6) повышение давления в камере выше максимально допустимого значения
- 7) повышения давления выше предельного выпускного давления (критическое давление для диффузионного насоса)



- |   |  |
|---|--|
| 1. форвакуумный насос                       | 10. устройство контроля высокого вакуума |
| 2. устройство контроля форвакуумн. давления | 11. камера                               |
| 3. электропневматич. клапан                 | 12. вакуумметр высокого вакуума          |
| 4. соединения подачи сжатого воздуха        | 13. переключатели                        |
| 5. устройство контроля давления             | 14. насос Рутса                          |
| 6. устройство контроля температуры          | 15. диффузионный насос                   |
| 7. устройство контроля охлаждающей воды     | 16. электропневматич. клапан             |
| 8. электропневматический клапан             | 17. клапан напуска                       |
| 9. устройство записи                        |  |

*Рисунок 3.20. Схема системы откачки до высокого вакуума с дополнительной работой насосов Рутса и диффузионного насоса*

Для предупреждения подобных неисправностей предпринимаются следующие меры (перечислены в том же порядке):

- 1) в случае отключения питания: все клапаны закроются, чтобы предотвратить напуск воздуха и защитить диффузионный насос от повреждения
- 2) защита в случае падения давления в подаче сжатого воздуха: за давлением сжатого воздуха следит устройство (5). Если давление упадет ниже указанного значения, сигнал с него автоматически закрывает клапан. В этом случае необходимо подать достаточное давление (не показано на рис. 3.20), которое позволит клапанам срабатывать.
- 3) при неисправности системы водяного охлаждения диффузионного насоса: за потоком и температурой следят специальные устройства (6 и 7). Если поток воды недостаточен, нагреватель диффузионного насоса выключается

при получении сигнала, клапан 8 закрывается.

4) в случае неисправности нагревателя диффузионного насоса: за перебоеми в нагревательной системе диффузионного насоса можно следить с помощью реле. Если температура повысится выше максимального допустимого значения, сработает устройство контроля температуры 6. Клапан 6 закроется, и будет дан сигнал.

5) при неисправности форвакуумного насоса: форвакуумный насос с ременным приводом оборудован центробежным переключателем, который отключит систему в случае разрыва ремня или другой неисправности. Моноблочные насосы, в которых привод устанавливается прямо на вал, управляются с помощью реле или подобных устройств.

6) защита при повышении давления в камере сверх установленного значения: устройство для высокого вакуума (10) подаст сигнал при превышении указанного давления.

7) гарантия поддержания критического выпускного давления: при превышении указанного давления, все клапаны закроются при срабатывании устройства контроля форвакуумного давления (2), а насосы выключатся при поступлении сигнала. Положение клапанов 3, 6, 8 определяется на панели управления через переключатели 13. Давление в камере измеряется высоковакуумным вакууметром 12 и записывается устройством 9. Защита от ошибок в работе может обеспечиваться за счет блокировки отдельных переключателей так, чтобы они могли активироваться в определенной последовательности. Например, диффузионный насос не может включиться когда форвакуумный насос не работает, или не достигнуто требуемое выпускное давление, или отключена подача охлаждающей воды.

В принципе, нет большого отличия между системой, защищенной от неисправностей, и полностью автоматизированной (с программным управлением), хотя целостность электрических контуров значительно возрастает.

### 3.5.3 Регулирование давления в системах с низким и средним вакуумом

Управление и регулирование существуют для определения величин физических переменных – для вакуумной системы это давление. Общим примером является активатор, который изменяет энергию, подаваемую на физическую переменную и тем самым изменяющий ее саму. Управление оказывает влияние на систему или прибор посредством команд. В этом случае активатор и действующее значение физической переменной изменяется

вместе с рабочей переменной. Пример: срабатывание клапана через переключатель давления. Действующее значение может измениться на нежелательное из-за дополнительного внешнего влияния. Управляемое устройство не может самостоятельно воздействовать на блок управления. По этой причине здесь используется система управления открытого типа. При регулировании действующее значение физической переменной постоянно сравнивается с установленным значением блокировки. Если есть отклонения, регулируется таким образом, что значение максимально приближается к значению блокировки. Для всех практических целей регулирование всегда требует управления. Главным звеном здесь является контроллер, в котором сравниваются действующее значение и значение блокировки. Все компоненты, задействованные в процессе управления, образуют контур управления. Названия, и характеристики переменных, используемых в процессе управления, указаны в стандарте DIN 19226.

В основном следует различать импульсное управление (двухшаговое или трехшаговое управление) с характеристиками диапазона давления, в котором оно может варьироваться, и постоянное управление (пропорционально-интегрально-дифференциальное ПИД-регулирование) с определенным значением давления блокировки, которое следует поддерживать максимально точно. Имеется два возможных пути настройки давления в вакуумных системах: первый – изменение скорости действия (изменение скорости насоса или дросселирования через закрытие клапана), второй – напуск газа (открытие клапана). Это приводит к 4<sup>EM</sup> основным действиям.

### Импульсное регулирование давления

Хотя постоянное регулирование несомненно дает лучший результат, в большинстве случаев двух или трехступенчатое регулирование вполне достаточно для всего вакуумного диапазона. Чтобы указать диапазон давления нужны две или три переменные и переключатель, зависящий от давления. Где установлен переключатель, не имеет значения: с вакуумметром с дисплеем, или с прибором ниже по потоку, если переключатель без дисплея. На рис. 3.21 показано различие между двухступенчатым регулированием скорости действия через дросселирование, двухступенчатым регулированием через напуск газа и трехступенчатым регулированием путем комбинации дросселирования откачки и напуска газа. На рис. 3.22 и 3.23 показаны структура и контур системы двухступенчатого регулирования с помощью откачки с дросселированием. При двухступенчатом регулиро-

вании через откачку с дросселированием (рис. 3.22) напряжение подается на клапан насоса 4, т.е. он открывается, когда контакты реле находятся в состоянии отключения. На уровне ниже верхней точки переключения клапан остается открытым из-за функции самоблокировки вспомогательного реле. Только на уровне ниже нижней точки переключения происходит срабатывание (замыкание) контактов реле. Если давление повышается, клапан откроется снова на верхней точке переключения.

При двухступенчатом регулировании через напуск газа входной клапан изначально закрыт. Если верхнее давление переключения не достигнуто, изменений не будет. Только когда давление упадет ниже нижней точки переключения, реле откроет входной клапан (подачи газа) и приведет в действие вспомогательное реле с одновременной функцией самоблокировки. Возврат в состояние ожидания с закрытием входного клапана (подачи газа) не произойдет до тех пор, пока после верхней точки переключения произойдет отключение функции самоблокировки реле.

На рис. 3.24. показана система трехступенчатого регулирования, созданная с использованием двух только что описанных компонентов. Как следует из названия, скомбинированы две точки переключения: нижняя точка переключения системы регулирования давления через откачку с дросселированием и верхняя точка переключения системы регулирования через напуск газа.

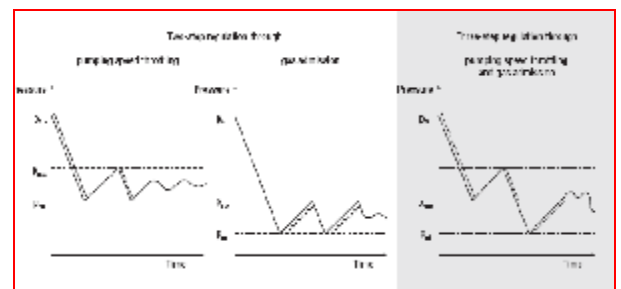


Рисунок 3.21. Двух и трехступенчатое регулирование давления

Чтобы избежать путаницы при установке вспомогательного дополнительного реле большинство приборов имеют возможность изменения типа функций встроенных значений через программное обеспечение. Первоначально можно выбрать между отдельными точками переключения (так называемыми триггерами уровня) и связанными точками переключения (интервальные триггеры). Эти функции объясняются на рис. 3.25. При использовании интервальных триггеров можно так же выбрать размер гистерезиса и тип характеристики блокировки, т.е. или фиксированное значение в приборе или параметр

через внешнее напряжение в диапазоне 0...10 В. Трехступенчатую систему регулирования (с дополнительными реле) можно, например, создать для вакуумметра LEYBOLD MEMBRANOVAC серии А. На рис. 3.26 показаны различные приборы новой серии А, которые, хоть и работают по различным методам измерений, показаны в одинаковом виде.

**Постоянное регулирование давления**

Выделим отдельно **электрические контроллеры** (ПИД контроллеры) с пропорциональными клапанами в качестве активаторов и механические диафрагменные контроллеры.

В системах регулирования с электрическими контроллерами координация между контроллером и активатором (пьезоэлектрическим клапаном подачи газа, клапаном подачи газа с приводом, управляющим поворотной заслонкой, дросселем) очень сложна из-за крайне различных граничных условий (объем камеры, быстрота откачки в камере, диапазон давления управления). Такие контуры управления имеют тенденцию к колебанию в случае неисправностей в работе. Обычно стандартные значения определить невозможно.

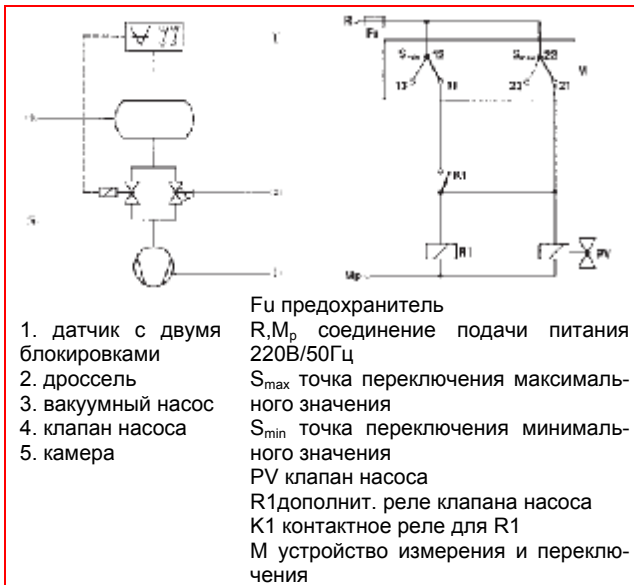


Рисунок 3.22. Двухступенчатое регулирование давления через откачку с дросселированием

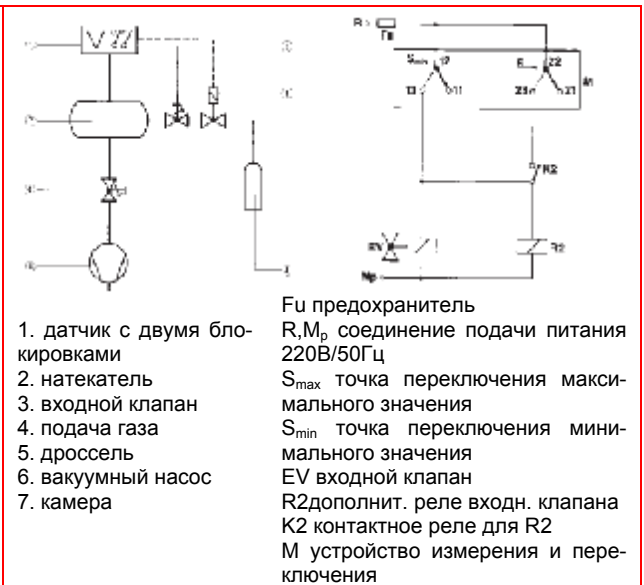


Рисунок 3.23. Двухступенчатое регулирование давления через напуск газа

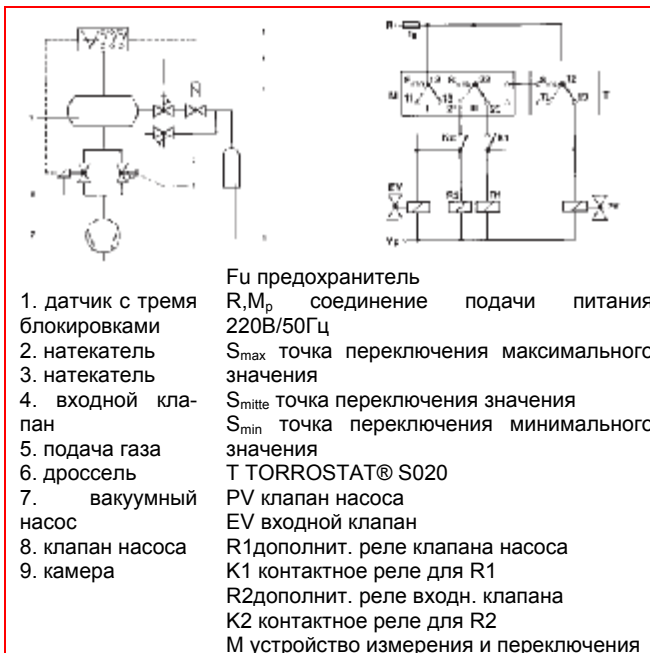


Рисунок 3.24. Трехступенчатое регулирование

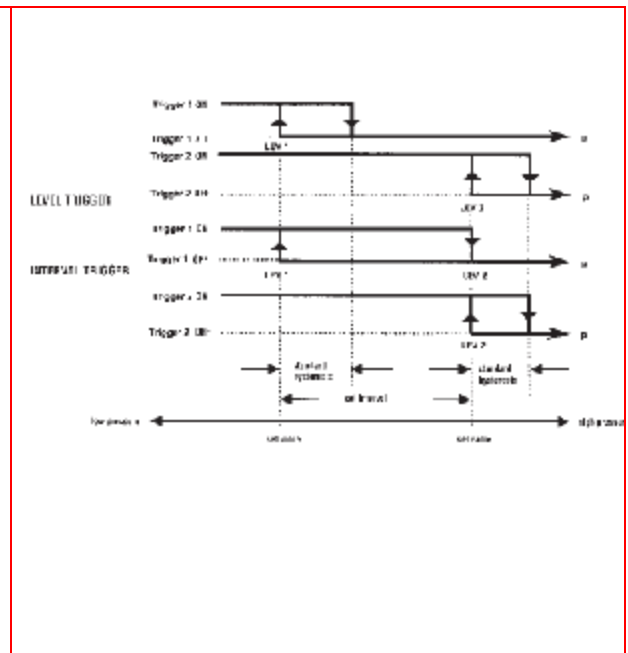


Рисунок 3.25. Диаграмма триггеров уровня и интервальных триггеров



Рисунок 3.26. LEYBOLD серия А, оборудование с различными триггерами

Большинство проблем управления можно легко решить с помощью **диафрагменного контроллера**. Принцип работы диафрагменного контроллера (рис. 3.27) можно получить из диафрагменного вакуумметра: прямой конец трубки или трубопровода закрыт с помощью эластичной резиновой диафрагмы (для опорного давления > рабочего давления) или свободен (для опорного давления < рабочего давления) так, что в последнем случае получается соединение между технологической стороной и вакуумным насосом. Это удобная и более или менее автоматизированная система регулирования обладает отличными характеристиками управления (рис. 3.28).

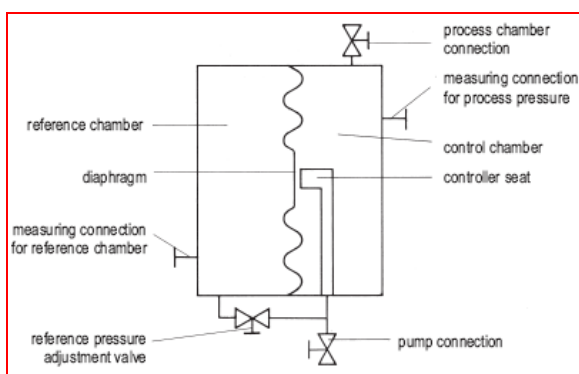


Рисунок 3.27. Схема диафрагменного контроллера

Чтобы получить большой поток, можно параллельно подключить несколько диафрагменных контроллеров. Это означает, что технологические камеры и опорные камеры соединены параллельно. На рис. 3.29 показано параллельное соединение трех диафрагменных контроллеров MR50.

Чтобы управлять вакуумным технологическим процессом часто необходимо изменять давление на отдельной стадии технологиче-

ского процесса. При использовании диафрагменного контроллера это можно сделать или вручную или с помощью электрического управления опорным давлением.

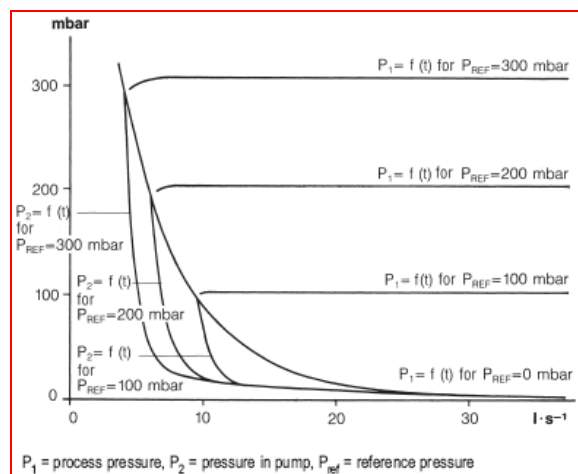


Рисунок 3.28. Характеристики управления диафрагменного контроллера.



Рисунок 3.29. Соединение трех диафрагменных контроллеров

Осуществить электрическое управление опорного давления диафрагменного контроллера относительно легко, т.к. объем опорной камеры маленький и его легко всегда поддерживать постоянным. На рис. 3.31 показан набор оборудования, и схема примера применения диафрагменного контроллера.

Чтобы иметь возможность изменения опорного давления и таким образом рабочего давления в сторону большего давления, необходимо установить дополнительный клапан подачи газа в технологическую камеру. Этот клапан откроется с помощью переключателя перепада давления (на рис. 3.31 не показан), когда перепад между желаемым высоким рабочим давлением и текущим рабочим давлением будет больше, чем установлен в переключателе.

### 3.5.4 Регулирование давления в системах с высоким и сверхвысоким вакуумом

Если давление поддерживается постоянным в определенных пределах, необходимо установить равновесие между газом, напускаемым в камеру, и газом, откачиваемым насосом через клапан или дроссель. Это не очень сложно для систем, работающих в области низкого и среднего вакуума, т.к. десорбция и адсорбция газа со стенок обычно пренебрежимо мала по сравнению с количеством газа, проходящим через систему. Регулирование давления можно осуществить через регулирование подачи газа или скорости откачки. Однако, использование диафрагменных контроллеров возможно только в диапазоне давлений от атмосферного до 10 мбар.

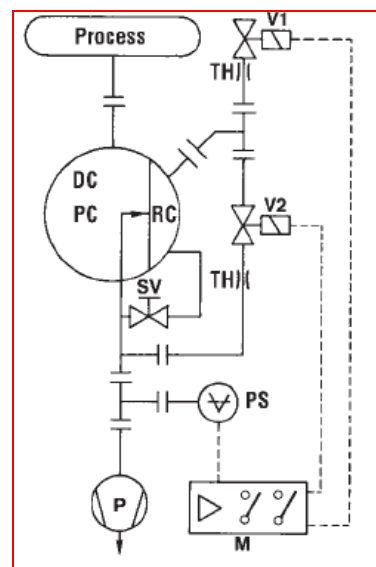
С другой стороны в области высокого и сверхвысокого вакуума выход газа со стенок камеры оказывает значительное влияние на давление. Установка характерных значений давлений в области высокого и сверхвысокого вакуума возможна, только если выход газа со стенок камеры пренебрежимо мал относительно управляемого напуска газа, осуществляемого прибором, регулирующим давление. По этой причине регулирование давления в этом диапазоне давления обычно осуществляют с помощью ПИД контроллеров и напуска газа. В качестве активаторов используются клапаны с регулируемым потоком (на текатели) с пьезоэлектрическим управлением или серводвигателем. Для регулирования давления ниже  $10^{-6}$  мбар для подачи газов следует использовать полностью прогреваемые металлические клапаны.

### 3.5.5 Примеры использования диафрагменных контроллеров

- 1) Регулирование процессов сушки/дистилляции с учетом максимальной допустимости паров воды пластинчатого насоса

В процессах сушки часто желательно выполнить сушку с помощью вакуумных насосов без использования конденсаторов. С точки зрения ограничения допустимости паров воды вакуумных насосов (примерно 30 мбар) это приведет к конденсации паров, образующихся в вакуумном насосе, дающих нерегулируемую (без дросселирования) быстроту действия. Этого можно избежать с помощью удаленного управления давлением диафрагменным контроллером с дополнительными клапанами управления и устройством измерения и переключения с преобразователем давления на входе вакуумного насоса, если

входное давление адаптируется по допустимости паров воды для насоса через автоматический мониторинг входного давления вакуумного насоса и дросселирование быстроты действия. Схема такого регулирования показана на рис. 3.30.



DC - диафрагменный контроллер,  
P - вакуумный насос,  
M - устройство измерения и переключения,  
PS - датчик давления,  
V1 - клапан насоса,  
V2 - клапан подачи газа,  
TH - дроссель,  
RC - опорная камера,  
PC - технологическая камера,  
CV - внутренний клапан управления опорного давления

*Рисунок 3.30. Управление процессом вакуумной сушки через регулирование входного давления вакуумного насоса по допустимости паров воды.*

Режим работы: запуск при атмосферном давлении с выключенным технологическим нагревом, клапан V1 вначале открыт (превышение максимальной точки переключения), т.к. в опорной камере преобладает атмосферное давление.

Диафрагменный контроллер закрыт. При запуске системы сначала откачивается соединительный трубопровод между вакуумным насосом и клапаном насоса V2. Как только давление падает ниже максимальной точки переключения, закрывается клапан V1. Когда давление падает ниже минимальной точки переключения, открывается клапан V2.

В этом случае давление в опорной камере медленно понижается, дросселирование диафрагменного контроллера снижается и, следовательно, снижается рабочее давление, пока количество технологических газов больше количества проходящего через насос, так что минимальная точка переключения снова превышает. Снова закрывается

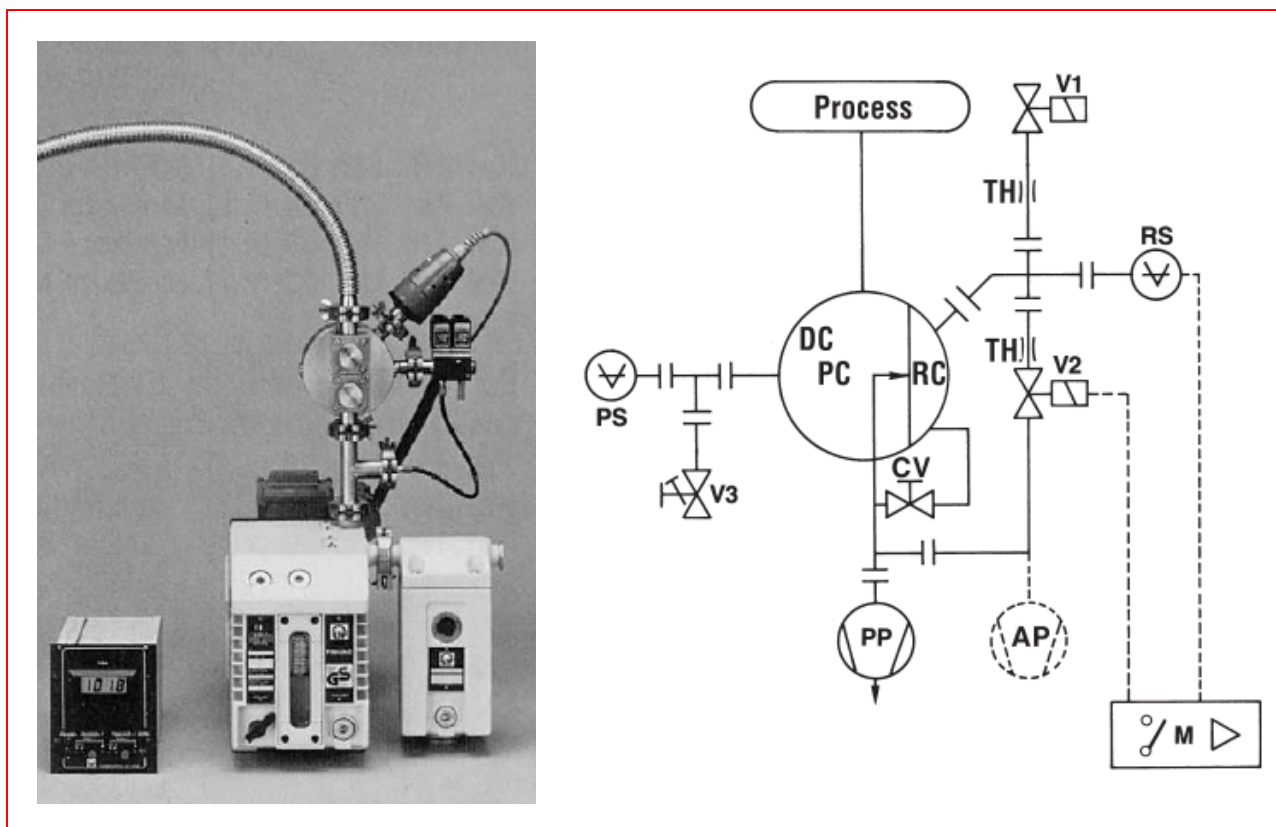
клапан V2. Эти действия повторяются до тех пор, пока давление в технологической камере не упадет ниже минимальной точки переключения. После этого клапан V2 откроется и процесс можно продолжить до достижения требуемого окончательного давления с полностью открытым диафрагменным контроллером.

Подвергающиеся сушке материалы обычно нагревают для ускорения процесса сушки. Если образуется небольшое количество паров воды, входное давление повышается выше двух точек переключения. В результате сначала закрывается клапан V2, а V1 открывается. С помощью подаваемого воздуха или защитного газа давление в опорной камере повышается и производительность в диафрагменном контроллере дросселируется, пока входное давление вакуумного насоса снова не упадет ниже установленной максимальной точки переключения. Тогда закрывается клапан V1.

В зависимости от количества аккумулированных паров воды производительность диафрагменного контроллера устанавливается через повышение или понижение опорного давления в каждом случае так, чтобы максимально допустимое парциальное давление паров воды на входе в насос никогда не превышалось.

Т.к. давление в технологической камере падает ниже установленной минимальной точки переключения относительно конца процесса сушки, клапан V2 откроется и останется открытым до конца. В этом случае, снова получится течение без дросселирования диафрагменного контроллера для ускорения процесса сушки. В тоже время за окончанием процесса сушки можно наблюдать через преобразователь давления PS.

2) регулирование давления диафрагменным контроллером с внешней автоматической настройкой опорного давления (рис. 3.31)



DC диафрагменный контроллер, PS датчик рабочего давления,  
RS датчик опорного давления, V1 клапан насоса,  
V2 клапан подачи газа, V3 натекатель, TH дроссель,  
M устройство измерения и переключения,  
PP технологический насос, RC опорная камера,  
PC технологическая камера, AP дополнительный насос,  
CV внутренний клапан управления опорного давления

**Рисунок 3.31. Диафрагменный контроллер с внешней автоматической регулировкой опорного давления**

Для автоматических вакуумных процессов с регулируемым рабочим давлением предварительная установка нужного давления зачастую более функциональна и может осуществляться автоматически. Если используется диафрагменный контроллер, такое регулирование можно выполнить оборудовав опорную камеру устройством измерения и переключения и клапаном управления, запирающим опорную камеру. Схема такой системы приведена на рис. 3.31.

Режим работы: при запуске при атмосферном давлении клапан подачи газа V1 закрывается в начале процесса. Клапан насоса V2 открывается. Технологическая камера откачивается до тех пор, пока установленное значение, которое предварительно задано в устройстве измерения и переключения, не будет достигнуто в технологической и опорной камерах. Когда давление упадет ниже установленного порогового значения переключения, клапан насоса V2 закроется. В результате значение давления будет поймано как опорное давление в опорной камере RC диафрагменного контроллера DC. Теперь рабочее давление будет автоматически поддерживаться на постоянном уровне согласно установленному опорному значению диафрагменным кон-

троллером. Если опорное давление повысится в ходе процесса в результате течей, то повышение будет автоматически определено устройством измерения и переключения и откорректировано кратковременным открытием клапана насоса V2. Эта дополнительная функция автоматического управления повышает надежность работы и расширяет диапазон применения. Корректировка повышенного опорного давления до установленного значения представляет особый интерес для регулируемых контуров гелия, т.к. повышение давления в опорной камере диафрагменного контроллера может компенсироваться этой системой как последовательность неизбежного проникновения гелия через диафрагму контроллера FPM.

Чтобы изменить опорное давление и таким образом повысить рабочее давление до высокого значения, необходимо установить клапан подачи газа в технологической камере. Этот клапан откроется с помощью переключателя перепада давления (не показан на рис. 3.31), когда перепад между желаемым высоким рабочим давлением и текущим рабочим давлением будет больше, чем установлен в переключателе.





## 4 Анализ газов при низких давлениях с использованием масс-спектрометрии

### 4.1 Введение

Анализ газов при низких давлениях полезен не только при анализе остаточных газов из вакуумного насоса, поиске течей во фланцевых соединениях или трубопроводах подачи (сжатого воздуха или воды) в вакуум. Он используется в пограничных областях применения и технологических процессах вакуумной технологии. Например, при анализе технологических газов при нанесении тонких слоев покрытий на подложки. Оборудование, используемое для количественного и/или качественного анализа газов включает специально разработанные масс-спектрометры очень маленьких размеров, которые, как любой вакуумметр, можно установить прямо в вакуумную систему. Их размер отличает эти измерительные приборы от других масс-спектрометров, которые, например, используются при химическом анализе газов. Последние почти не подходят для измерения парциальных давлений, так как они слишком большие и им требуется длинный трубопровод для подключения к вакуумной камере, плюс они не могут прогреваться вместе с камерой. Затраты на аналитический масс-спектрометр значительно больше, т.к., например, требования к разрешению будут более сильными при измерении парциальных давлений. Под парциальным давлением понимается давление, создаваемое определенным газом в его смеси с другими газами. Сумма всех парциальных давлений газов дает общее давление. Различие между различными газами основано на их молярной массе. Первой целью анализа является регистрация количественных пропорций газов в системе по их молярным массам и качественное определение количества отдельных типов газов, имеющих различные атомные числа.

Приборы для парциального измерения давления, которые широко используются, состоят из измерительной системы (сенсора) и устройства управления, необходимого для его работы. Сенсор состоит из источника ионов, системы разделения и ионной ловушки. Разделение ионов, различающихся по массе и заряду, происходит за счет использования явления, заставляющего ионы резонировать в электрическом и магнитном полях.

Поначалу блоки управления были очень грубые и предлагали бесчисленное количество

опций. Только ученые могли использовать их. С использованием компьютеров требования к блокам управления стали еще больше. Сначала им потребовался интерфейс для связи с компьютером. Были попытки создания блоков для работы с компьютером, имеющим дополнительную плату с контуром измерений сигналов сенсора. Сегодняшние сенсоры на деле являются трансмиттерами, оборудованными блоками питания, установленными прямо со стороны атмосферы. Связь с компьютером осуществляется через стандартные интерфейсы (RS232, RS485). Удобство работы достигается за счет программного обеспечения.

### 4.2 Исторический обзор

Понадобилось около 90 лет, чтобы от первой попытки Томсона в 1897 г. определить отношение заряда к массе  $e/m$  для электрона, перейти к применению вакуумной технологии. Они включают Омегатрон, Тропотрон и квадрупольный масс-спектрометр, предложенный Полем и Штейнведелем в 1958 г, выпускаемые INFICON в стандартной модели в виде TRANSPECTOR (см. рис. 4.1). Первым использованием масс-спектрометрии в вакуумной технологии было применение его Бакусом в 1943/44 г при исследованиях в Радиографической Лаборатории Калифорнийского Университета. При отделении изотопов урана он использовал спектрометр с сектором поля  $180^\circ$  после Демстера (1918), который предложил его использовать как вакуумный анализатор. Подобный термин используется даже сегодня (при анализе остаточных газов RGA), особенно в США и Великобритании, вместо масс-спектрометра. Сегодня они находят применение при мониторинге процессов производства полупроводниковых компонентов.



а. высокочувствительный сенсор с канальным электронным умножителем,  
 б. компактный сенсор с микроканальной пластиной,  
 с. высокочувствительный сенсор с детектором Фарадея

Рисунок 4.1а. Сенсоры TRANSPECTOR



Рисунок 4.1b. сенсор TRANSPECTOR XPR

### 4.3 Квадрупольный масс-спектрометр (TRANSPECTOR)

Ионный луч, полученный из источника ионов с электронным ударом, разделяется в квадрупольной системе разделения, содержащей 4 стержня – электрода. Поперечные сечения стержней образуют гиперболы, так что окружающее электрическое поле почти гиперболическое. Каждый из двух противоположных стержней имеет равные потенциалы, постоянного напряжения тока и наложенное высокочастотное переменное напряжение (рис. 4.2). Прикладываемое напряжение приводит к колебанию в центре перемещения ионов между стержнями. Амплитуды всех колебаний возрастают, так что ионы будут контактировать со стержнями. Только в этом случае ионы с определенным отношением массы к заряду  $m/e$  будут соответствовать условию резонанса, которое позволит пройти через систему. После выхода из системы разделения ионы двигаются к ионной ловушке (детектору Фарадея), которым может быть и вторично-электронный умножитель SEMP.

Длина датчика и системы разделения примерно 15 см. Чтобы гарантировать, что ионы могут перемещаться от источника ионов до ионной ловушки длина свободного пути внутри сенсора должна быть больше 15 см. Для воздуха и азота значение  $p \cdot \lambda =$

$6 \cdot 10^{-3} \text{ мбар} \cdot \text{см}$ . При давлении  $1 \cdot 10^{-4} \text{ мбар}$ , длина свободного пути  $\lambda = 60 \text{ см}$ . Обычно это давление берется в качестве минимального вакуума для масс-спектрометра. Контур аварийного отключения для катода (на превышение давления) всегда устанавливается примерно на  $5 \cdot 10^{-4} \text{ мбар}$ . Желание использовать квадрупольный масс-спектрометр при более высоком давлении без специальных преобразователей давления привело к созданию сенсора XPR на Inficon (XPR – сокращение от расширенного диапазона давления). Чтобы обеспечить возможность прямых измерений в диапазоне давлений около  $2 \cdot 10^{-2} \text{ мбар}$ , столь важном для процессов распыления, стержни системы укорачиваются с 12 см до 2 см. Чтобы гарантировать, что ионы смогут совершить необходимое количество колебаний, требуемое для разделения по массе, а их количество около 100, частота тока в сенсоре XPR увеличивается с 2 МГц примерно в 6 раз до 13 МГц. Несмотря на снижение длины стержней выход ионов снижается еще и из-за процесса рассеивания при столь высоком давлении. Чтобы получить лучшее изображение спектра требуется дополнительная электронная корректировка. Размеры сенсора XPR столь малы, что его можно спрятать внутри трубопровода фланцевого соединения (DN40, CF) и не занимать места в вакуумной камере. На рис.4.1.a представлено сравнение размеров обычных высокочувствительных сенсоров с канальным умножителем SEMP и без и обычного сенсора с канальной пластиной SEMP. На рис. 4.1.b показан сенсор XPR. Высокий вакуум, необходимый для масс-спектрометра, обычно создается с помощью турбомолекулярного насоса TURBOVAC 50 и пластинчато-роторного насоса D1.6B. Благодаря своей большой компрессии и способности турбомолекулярного насоса хорошо откачивать молекулы с высокой молярной массой, сенсор и его катод идеально защищены от загрязнения из области форвакуума.

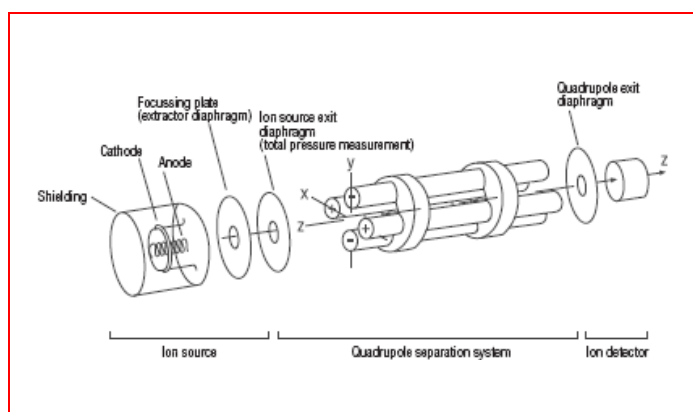


Рисунок 4.2. Схема квадрупольного масс-спектрометра

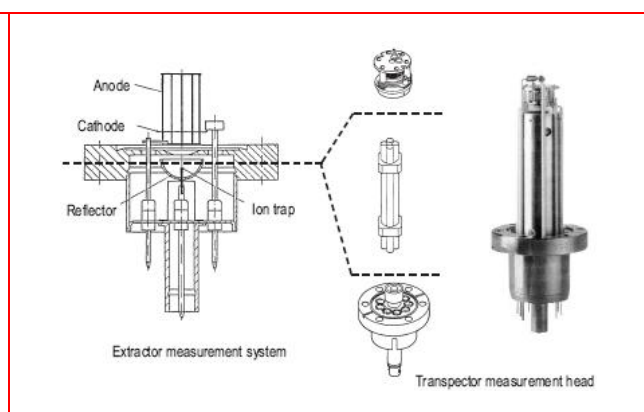


Рисунок 4.3. Квадрупольный масс-спектрометр – экстрактор ионизационного вакуумметра

### 4.3.1 Конструкция сенсора

Можно представить, что сенсор разделен на отдельный экстрактор системы измерений (рис. 4.3), тогда как система разделения вставлена между источником ионов и ионной ловушкой.

#### 4.3.1.1 Обычный (открытый) источник ионов

Источник ионов состоит из катода, анода и нескольких экранов. Эмиссия электронов, поддерживаемая постоянной вызывает частичную ионизацию остаточного газа, в котором находится источник ионов. На вакуум вокруг сенсора обычно оказывает влияние нагрев стенок или катода. Ионы будут выходить через экраны вдоль направления системы разделения. Один из экранов подсоединен к отдельному усилителю и, независимо от разделения ионов, обеспечивает непрерывное измерение общего давления (рис. 4.4). Катоды изготовлены из иридия и покрыты оксидом тория для снижения работы, связанной с выходом электронов (сейчас оксид тория заменяют оксидом иттрия). Эти покрытия снижают работу выхода электронов, так чтобы получить нужный поток эмиссии при более низкой температуре катода. Для особых областей применения катоды изготавливают из вольфрама (нечувствительного к углеводородам, но чувствительного к кислороду) или рения (нечувствительного к углеводородам и кислороду, но медленно испаряющемуся во время работы при высоком давлении паров воды).

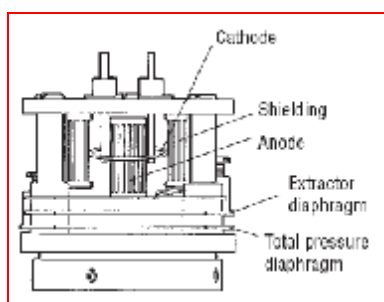


Рисунок 4.4. Открытый источник ионов

#### 4.3.1.2 Разделение квадрупольной системы

Здесь ионы разделяются на основании их отношения масса/заряд. Из физики известно, что отклонение электрически заряженных частиц (ионов) от их траектории возможно только в соответствии с их отношением массы к заряду, т.к. притяжение частиц пропорционально заряду, а инерция (которая обеспечивает сопротивление) пропорциональна массе. Система разделения состоит из 4 цилиндрических металлических стержней, установленных параллельно и изолированных

друг от друга. Два противоположных стержня имеют одинаковые потенциалы. На рис. 4.2 показаны стержни системы разделения и их питание. Электрическое поле  $\Phi$  внутри системы разделения создается в результате наложения постоянного напряжения и высоко-частотного напряжения переменного тока:

$$\Phi = (U + V \cdot \cos \omega t) \cdot (x^2 - y^2) / r_0^2$$

$r_0$  = радиус цилиндра, который можно вписать внутри стержней системы.

На однозарядные ионы,двигающиеся вблизи и параллельно осевой линии внутри системы разделения, перпендикулярном их движению направлению действует сила:

$$F_x = -\frac{2e}{r_0^2} \cdot x \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$F_y = -\frac{2e}{r_0^2} \cdot y \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$F_z = 0$$

Математическое решение этих уравнений движения использует дифференциальные уравнения Матье. Оно демонстрирует, что существуют стабильные и нестабильные пути ионов. При стабильном пути, расстояние ионов от осевой линии системы разделения всегда остается меньше  $r_0$  (условие прохода). При нестабильном пути расстояние до оси будет возрастать, пока ионы не начнут соударяться с поверхностью стержней. Ионы будут разряжены/нейтрализованы и станут недоступными для детектора (состояние блокировки).

Даже без решения дифференциальных уравнений можно дать чисто феноменологическое объяснение, которое основано на понимании наиболее важных характеристик квадруполя системы разделения.

Рассмотрим движение одиночного положительно заряженного иона с атомной массой  $M$ ,двигающимся в двух плоскостях, перпендикулярных друг другу и проходящих через центры двух противоположных стержней. На рис. 4.5 показано пошаговое описание процесса:

1. на стержень действует только постоянный потенциал  $U$ :

Плоскость  $xz$ : на стержнях положительный потенциал  $+U$  с эффектом отталкивания

иона направляет его к центру. И он достигает коллектора ( проход).

Плоскость **yz**: на стержне отрицательный потенциал  $-U$ , означающий, что в случае малейшего отклонения от оси ион направится к ближайшему стержню, где будет нейтрализован, ион не достигает коллектора ( блокировка).

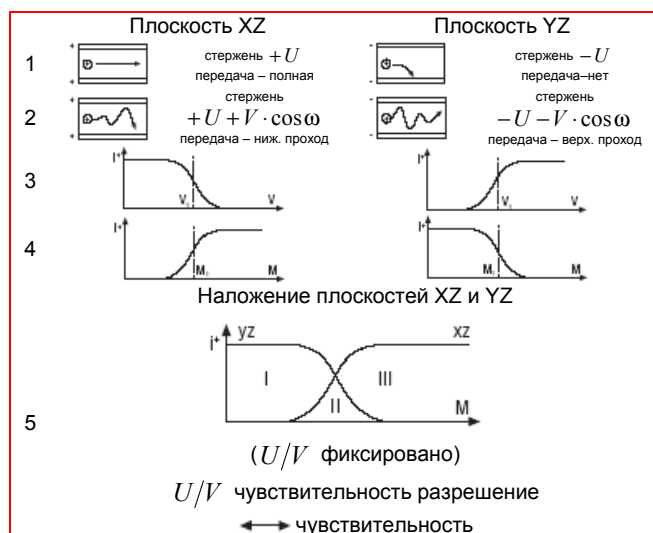


Рисунок 4.5. Феноменологическое объяснение системы разделения

2. наложение высокочастотного напряжения  $V \cdot \cos \omega \cdot t$ :

Плоскость **xz**: на стержне потенциал  $+U + V \cdot \cos \omega \cdot t$ . При повышении амплитуды напряжения  $V$  переменного тока ион будет выполнять колебания с большей амплитудой, пока он не соприкоснется со стержнем и не будет нейтрализован. Система разделения остается заблокированной для больших значений  $V$ .

Плоскость **yz**: на стержне потенциал  $-U - V \cdot \cos \omega \cdot t$ . Здесь наложение создает дополнительную силу, так что при некоторых значениях  $V$  амплитуда колебания ионов будет меньше, чем расстояние между стержнями и ион сможет пройти к коллектору при достаточно больших  $V$ .

3) эмиссия иона  $i^+ = i^+(V)$  для фиксированной массы  $M$ .

Плоскость **xz**: для  $V < V_1$  отклонение, которое будет результатом возрастания колебаний, будет меньше  $V_1$ , т.е. в диапазоне прохода. Когда  $V > V_1$ , отклонение будет достаточным для блокировки.

Плоскость **yz**: для  $V < V_1$  отклонение, которое будет результатом уменьшения колебаний, будет меньше  $V_1$ , т.е. в диапазоне блокировки. Когда  $V > V_1$ , отклонение будет достаточным для остановки колебаний и прохода.

4) поток иона  $i^+ = i^+(V)$  для фиксированного отношения  $U/V$  в зависимости от массы иона.

Здесь отношение полностью противоположно случаю 3, т.к. влияние  $V$  на легкие массы больше, чем на тяжелые.

Плоскость **xz**: для масс  $M < M_1$  отклонение, которое будет результатом возрастания колебаний, будет больше чем при  $M_1$ , т.е. в диапазоне блокировки. При  $M > M_1$ , отклонения не будет, и ион может пройти.

Плоскость **yz**: для  $M < M_1$  отклонение, которое будет результатом уменьшения колебаний, будет больше чем при  $M_1$ , т.е. в диапазоне не прохода. При  $M > M_1$ , отклонение будет достаточным для блокировки.

5) комбинация плоскостей. В наложении токов ионов  $i^+ = i^+(M)$  для двух пар стержней (фиксированное  $U/V$ ) есть три важных диапазона:

Диапазон I: нет прохода массы  $M$  из-за блокировки пары стержней **xz**.

Диапазон II: фактор прохода системы стержней для массы  $M$  определяется через соотношение  $U/V$  (другие ионы не пройдет). Видим, что большая проходимость (соответствующая высокой чувствительности) осуществляется за счет низкой чувствительности (= разрешению, см. раздел 4.5). Идеальная настройка системы разделения требует компромисса между этими двумя свойствами. Чтобы получить постоянное разрешение, соотношение  $U/V$  должно оставаться постоянным на всем диапазоне измерения. Атомная масса  $M$  (раздел 4.6.1) ионов, которые могут пройти через систему разделения, удовлетворяет условию:

$$\frac{m}{e} \approx M = \frac{V}{14.438 \cdot f^2 \cdot r_0^2}$$

где  $V$  =высокочастотная амплитуда,



$r_0$  = внутренний радиус квадруполя,  
 $f$  = частота.

В итоге этого линейная зависимость от  $V$  даст спектр массы с линейной шкалой в результате одновременного пропорционального изменения  $U$  и  $V$ .

Диапазон III: масса  $M$  не может пройти из-за блокировки пары стержней в плоскости  $yz$

#### 4.3.1.3 Система измерения (детектор)

После прохождения системы разделения ионы попадают в ионную ловушку или детектор, который в самом простом случае будет детектором (клеткой) Фарадея. В любом случае ионы, которые будут ударяться о детектор, будут нейтрализоваться электронами из ионной ловушки. После электрического усиления, измеренный ток соответствует потоку эмиссии ионов. Чтобы получить большую чувствительность на месте детектора Фарадея можно установить вторично-электронный умножитель SEMP.

Канальный электронный умножитель или детектор с канальной пластиной можно использовать как SEMP. Умножители SEMP являются виртуально безинерционными усилителями с увеличением примерно  $10^{+6}$  на выходе. Усиление будет на деле снижаться во время фазы начального использования, но затем станет виртуально постоянным в течении длительного периода. На рис. 4.6 слева показана базовая конфигурация ионной ловушки Фарадея, а справа – сечение канального электронного умножителя. При записи спектра период сканирования на линию массы  $t_0$  и постоянная времени усилителя  $\tau$  должны удовлетворять условию  $t_0 = 10\tau$ . В современных приборах, таких как TRANSPECTOR

выбор периода сканирования и постоянной времени усилителя будет ограничен микропроцессором через логическую пару значений.

## 4.4 Подача газа и адаптация давления

### 4.4.1 Дроссель

Самым простым способом адаптации классического масс-спектрометра к давлению выше  $1 \cdot 10^{-4}$  мбар является использование дросселя. Основным недостатком является то, что т.к. свойства потока точно не определены, можно наблюдать отклонения от начального состава газа.

### 4.4.2 Преобразователь давления (конвертер)

Чтобы исследовать смесь газов при общем давлении выше  $1 \cdot 10^{-4}$  мбар необходимо использовать преобразователь давления, который не будет отделять газы. Рис. 4.7 представлен для объяснения работы подобного преобразователя давления:

*а. Рабочее давление < 1 мбар. Одноступенчатый преобразователь давления.* Газ может проходить через вакуумную камеру в молекулярном режиме через диафрагму с проводимостью  $L_2$  и в камеру сенсора (со своей собственной высоковакуумной системой). Молекулярный режим приведет к отделению, но оно не будет зависеть от уровня давления (раздел 1.5). Вторая диафрагма с молекулярным режимом, расположенная между камерой сенсора и турбомолекулярным насосом будет компенсировать отделение, происходящее при  $L_2$ .

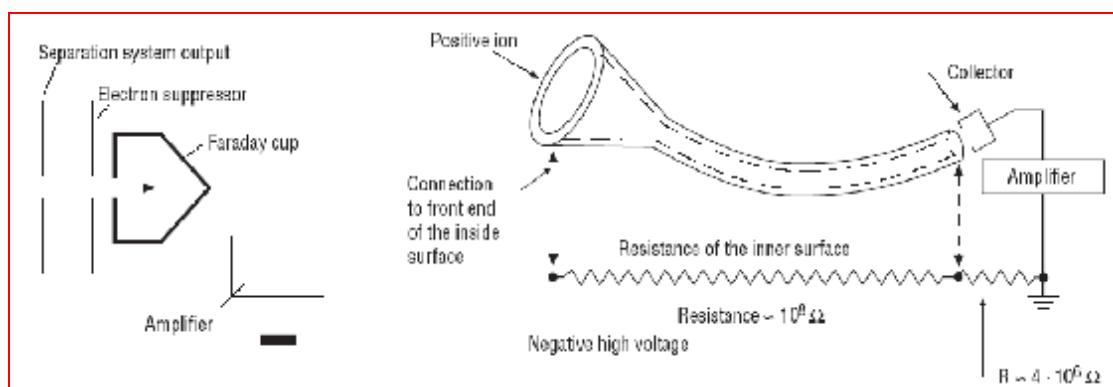


Рисунок 4.6. Схема детектора Фарадея (слева) и канальный умножитель (справа)

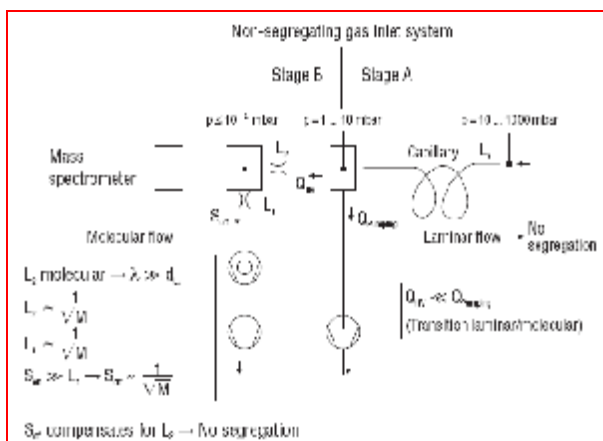


Рисунок 4.7. Принцип преобразователя давления (ступень В только для одноступенчатых, А и В – для двухступенчатых)

б. Рабочее давление  $> 1$  мбар. Двухступенчатый преобразователь давления. Использование маленького (пластинчато-роторного) насоса с ламинарным режимом переводит газ из области низкого вакуума через капилляр или диафрагму (проводимости  $L_3$ ). Перед тем, как попасть в насос при давлении около 1 мбар небольшая часть этого потока снова входит в камеру сенсора через диафрагму проводимостью  $L_2$  при молекулярном режиме течения.

Фальсификации состава смеси газа, происходящей в результате адсорбции и конденсации, можно избежать путем нагрева преобразователя давления и капилляра.

Чтобы определить влияние состава газа через измерения прибора будет необходима информация о температуре нагрева, материалах, площади поверхности для металлических, стеклянных и керамических компонентов, характеристиках материалов и размерах катода (и энергия электронного удара для источника ионов).

#### 4.4.3 Закрытый источник ионов CIS

Чтобы избежать влияния, которое может происходить из камеры сенсора или катода (т.е. нарушение CO-CO<sub>2</sub> равновесия за счет нагрева катода) в большинстве случаев будет использоваться закрытый источник ионов CIS (рис. 4.8).

Этот источник разделен на две секции: камеру катода, где происходит эмиссия электронов, и камеру удара, где происходит ионизация ударом частиц газа. Две камеры откачиваются по отдельности: давление в камере катода составляет около  $1 \cdot 10^{-5}$  мбар, а в камере удара – около  $1 \cdot 10^{-3}$  мбар. Газ из вакуумной камеры поступает в камеру удара через прогреваемый клапан с металлическим уплотнением (преобразователь давления, сверхвысоковакуумные технологии). Здесь при  $10^{-3}$  мбар происходит ионизация высокого выхода. Электроны, вызывающие удар, эмитируются в камере катода при давлении около  $1 \cdot 10^{-5}$  мбар и проходят через небольшое отверстие в камеру удара. Отношение сигнал/помехи (остаточный газ) относительно открытого источника ионов будет увеличиваться в  $10^{+3}$  раз и более. На рис. 4.8. показано основное отличие в конфигурации открытого и закрытого источников ионов для типового использования в процессе напыления. При модифицированной конструкции CIS, по сравнению с открытым источником ионов, благодаря геометрии и энергии электрона (открытый источник ионов 102 эВ, CIS – 75 или 35 эВ), можно определить, где выбран нижний уровень энергии электронов. Например, изотоп аргона  $36^{++}$  при массе 18 нельзя определить при энергии электрона менее 43.5 эВ, и поэтому нельзя фальсифицировать определение  $H_2O^+$  при массе 18 в процессе напыления, используя аргон в качестве рабочего газа, в процессах, которые очень важны в промышленности.

#### 4.4.4 Измерение агрессивных газов AGM

В большинстве случаев исследуемый технологический газ так агрессивен, что катод может выдерживать только короткий период работы. Мониторинг агрессивных газов AGM использует свойство ламинарного потока, с помощью которого не образуется обратных потоков. Управляемая с помощью отдельного AGM клапана часть рабочего газа, подаваемого в процессе, вводится как газ продувки, перед преобразователем давления, в TRANSPECTOR. Это устанавливает поток в направлении вакуумной камеры. Таким образом, технологический газ может достигнуть TRANSPECTOR только если AGM клапан закрыт. Когда AGM клапан открывается, TRANSPECTOR видит только чистый рабочий газ. На рис. 4.9 показан принцип мониторинга агрессивных газов AGM.

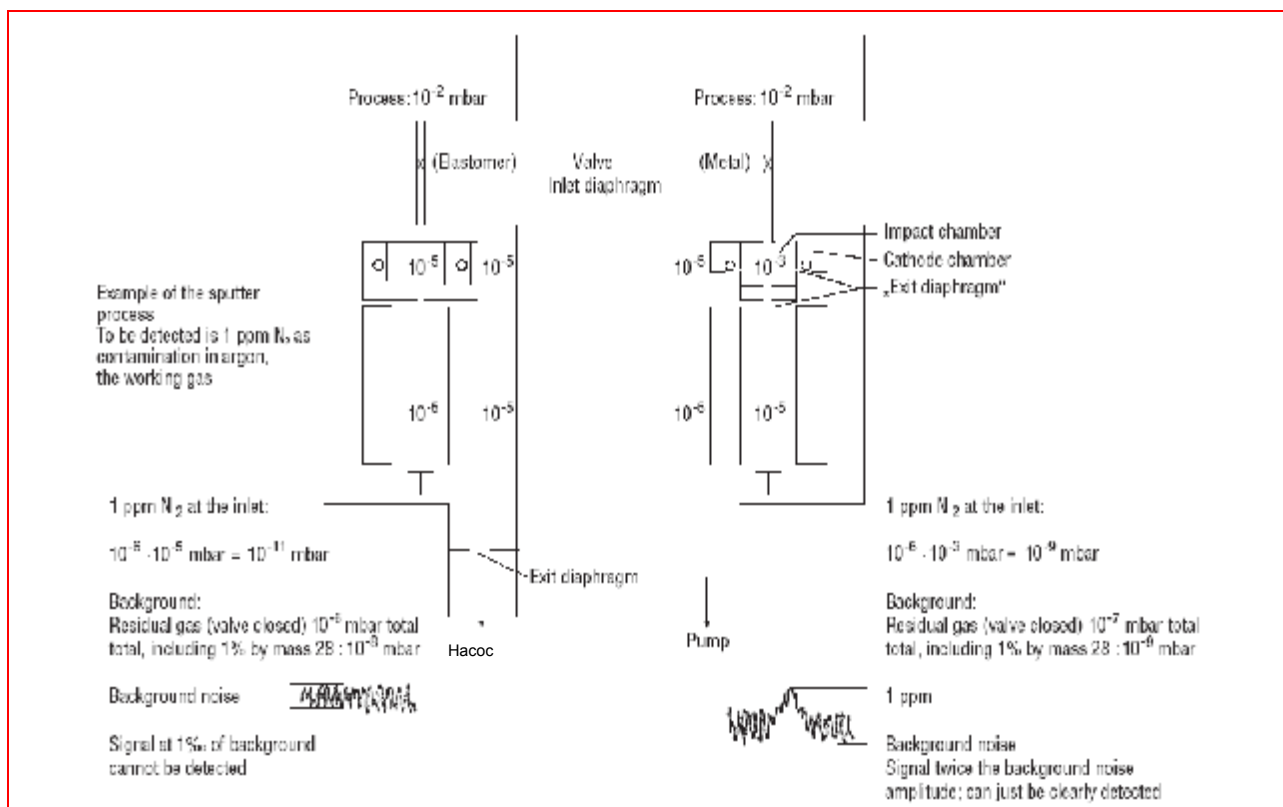


Рисунок 4.8. Открытый (слева) и закрытый (справа) источники ионов

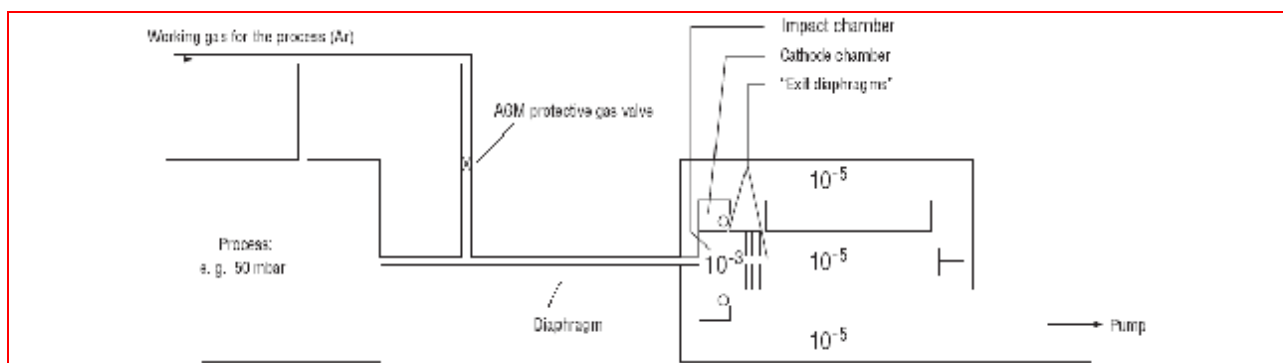


Рисунок 4.9. Принцип мониторинга агрессивных газов

## 4.5 Графические значения в масс-спектрометрии (характеристики)

Требования для приборов измерения парциальных давлений указаны в DIN 28 410.

### 4.5.1 Ширина линии (разрешение)

Толщина линии является мерой степени, при которой можно провести дифференциацию между двумя соседними линиями одинаковой высоты. Обычно так обозначается разрешение. Оно определяется как  $R = M/\Delta M$  и является постоянным для квадрупольного масс-

спектрометра на всем диапазоне масс, чуть более 1 или  $\Delta M < 1$ .

Очень часто используется такое выражение, как «разрешение прибора с 15% минимума». Это означает, что нижняя точка минимума (спада) между двумя соседними пиками одинаковой высоты составляет 15% от высоты пика или, иными словами, 7.5% от высоты самого пика ширины линии DM, измеренной для отдельного пика равного 1 а.е.м. (атомной единицы массы) – см. рис.4.10.

### 4.5.2 Диапазон масс

Диапазон масс характеризуется атомными числами для легких и тяжелых ионов с указанием знака заряда, определяемого прибором.

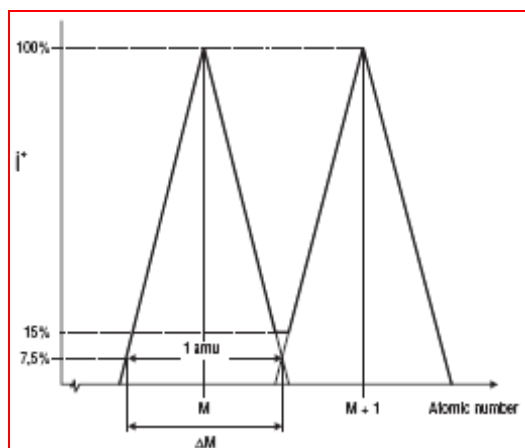


Рисунок 4.10. Толщина линии 15% минимума.

### 4.5.3 Чувствительность

Чувствительность  $E$  является отношением измеренного потока ионов и соответствующего парциального давления. Обычно указывается по аргону или азоту:

$$E = \frac{i^+}{p_G} \left( \frac{A}{\text{мбар}} \right) \quad (4.1)$$

Обычно значение для детектора Фарадея  $E = 1 \cdot 10^{-4} \text{ А/мбар}$  а для SEMP -  $E = 1 \cdot 10^{+2} \text{ А/мбар}$ .

### 4.5.4 Минимальное определяемое парциальное давление

Минимальное определяемое парциальное давление определяется как отношение амплитуды помех к чувствительности:

$$p_{\min} = \frac{\Delta i_R^+}{E} \text{ (мбар)}$$

$\Delta i_R^+$  = амплитуда помех.

Пример (рис. 4.11):

Чувствительность  $E = 1 \cdot 10^{-4} \text{ А/мбар}$ , помехи  $\Delta \cdot i_R^+ = 4 \cdot 10^{-14} \text{ А}$

$$p_{\min}(FC) = \frac{4 \cdot 10^{-14} \text{ А}}{1 \cdot 10^{-4} \text{ А/мбар}} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ мбар}$$

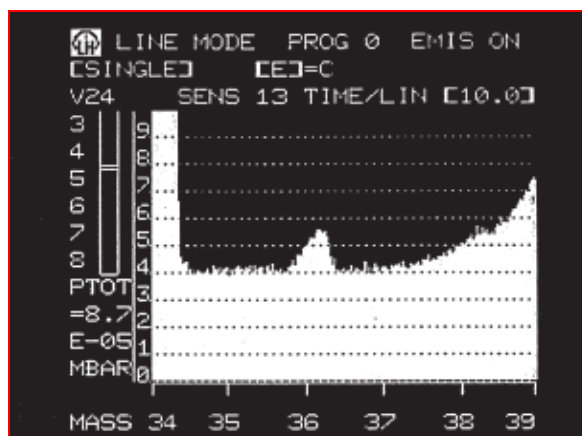


Рисунок 4.11. Определение аргона  $Ar_{36}$

### 4.5.5 Минимальный определяемый перепад парциальных давлений (концентрация)

Определяется как

$$SDPPR = \frac{P_{\min}}{P_{\Sigma}} \text{ (ppm)}$$

Это определение, которое подчас неудобно для практического использования, объясняется на примере определения  $Ar_{36}$  в воздухе: в воздухе содержится 0,93% аргона по объему, относительная частота изотопа  $Ar_{40}$  к  $Ar_{36}$  составляет 99,6% к 0,337%. Т.е. содержание аргона в воздухе  $Ar_{36}$  составляет:

$$0,93 \cdot 10^{-2} \cdot 0,337 \cdot 10^{-2} = 31,3 \text{ ppm}$$

На рис. 4.11 показан вид экрана при измерении. Пик высоты для  $Ar_{36}$  на рисунке определяется при  $1,5 \cdot 10^{-13} \text{ А}$  и помехах амплитуды  $4 \cdot 10^{-14} \text{ А}$ .

Минимальная определяемая концентрация – это концентрация, при которой высота пика равна помехе амплитуде. Это дает минимальный измеряемый пик  $1,5 \cdot 10^{-13} \text{ А} / 2,4 \cdot 10^{-14} \text{ А} = 1,875$ . минимальная определяемая концентрация получается как

$$\frac{31,3 \cdot 10^{-6}}{1,875} = 16,69 \text{ ppm}$$

### 4.5.6 Линейность диапазона

Линейность диапазона – это диапазон давления для опорного газа ( $N_2$ ,  $Ar$ ), в котором чувствительность остается постоянной в указанных пределах ( $\pm 10\%$  для устройств измерения парциальных давлений).



В диапазоне ниже  $1 \cdot 10^{-6}$  мбар отношение между потоком ионов (ионным током) и давлением строго линейное. В диапазоне  $1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-4}$  мбар есть небольшое отклонение от линейности. Выше  $1 \cdot 10^{-4}$  мбар это отклонение возрастает, а в диапазоне выше  $10^{-2}$  мбар ионы из-за плотности газа не могут достичь ионной ловушки. Функция аварийного отключения для катода (при превышении давления) всегда устанавливается на  $5 \cdot 10^{-4}$  мбар. В зависимости от использования верхний предел будет отличаться.

При исследовательских работах, если возможно, не следует превышать  $1 \cdot 10^{-6}$  мбар. Диапазон  $1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-6}$  мбар еще подходит для четкого описания состава газа и регулирования парциальных давлений (рис. 4.12)

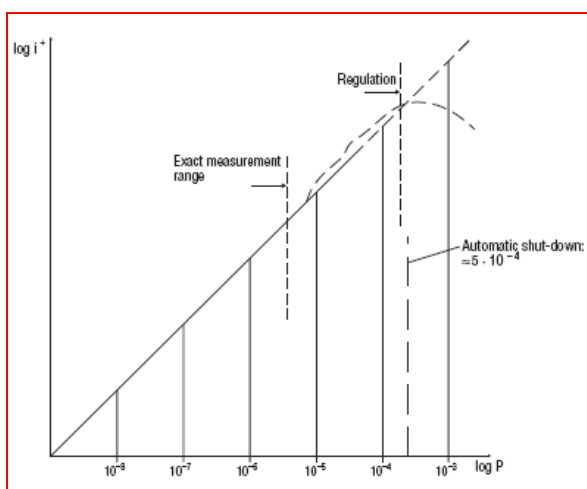


Рисунок 4.12. Кривая количественной линейности

#### 4.5.7 Информация о поверхности и прогрев

Дополнительная информация, необходимая для оценки сенсора, включает температуру прогрева (во время измерения или выключения катода или SEMP), используемые материалы и площадь поверхности металла, стекла и керамических компонентов, материалов и размеров катода, данных, необходимых для определения энергии электронного удара в источнике ионов и возможности настройки. Эти значения являются критическими для непрерывной работы и влияния сенсора на состав газа.

## 4.6 Исследование спектра

### 4.6.1 Ионизация и основные проблемы при анализе газов

Постоянное изменение напряжений, прикладываемых к электродам в системе разделения (сканирования) дает увеличение в отношении между ионным током  $i^+$  и атомным номером, который пропорционален отношению  $m/e$  и выражается как:

$$M = \frac{M_r}{n_e} \quad (4.2)$$

( $M_r$  = относительная молярная масса,

$n_e$  = количество элементарных зарядов  $e$ )

Это так называемый спектр масс,  $i^+ = i^+(M)$ .

Спектр отображает  $i^+$  как ординаты, вычерченные напротив атомных номеров  $M$  вдоль оси абсцисс.

Одна из сложностей в интерпретации таких спектров масс заключается в том, что одна и та же масса (ур. 4.2) может ассоциироваться с различными ионами. В качестве примера, приведем такой: атомный номер  $M = 16$  соответствует ионам  $\text{CH}_4^+$  и  $\text{O}_2^{++}$ , а  $M = 28$  –  $\text{CO}^+$ ,  $\text{N}_2^+$  и  $\text{C}_2\text{H}^+$ . Поэтому при изучении спектра необходимо уделить особое внимание следующему:

1) в случае **изотопов** мы имеем дело с различным числом позитронов в ядре (массе) иона при одинаковом числе зарядов (род газа). Некоторые значения частоты изотопов представлены в табл. 4.2.

2) в зависимости от энергии ударяющихся электронов (равняется разности потенциалов катод – анод) ионы могут ионизироваться однократно или многократно. Например, можно обнаружить  $\text{Ar}^+$  при массе 40,  $\text{Ar}^{++}$  при массе 20 и  $\text{Ar}^{+++}$  при массе 13,3. При массе 20 можно еще найти неон  $\text{Ne}^+$ . Существуют пороговые уровни энергии электронов удара для всех состояний ионизации для каждого рода газа, т.е. каждый тип ионов может образоваться только при энергии выше соответствующего уровня. На рис. 4.13 показаны уровни для аргона.

3) **удельная ионизация различных газов**  $S_{\text{gas}}$  числа формируемых ионов (на см и мбар) при соударении с электронами. Она варьиру-

ется в зависимости от рода газа. Для большинства газов выход ионов больше при уровне энергии электронов в диапазоне 80...110 эВ (рис. 4.14).

На практике учитывают различные скорости ионизации для отдельных газов относительно азота. **Относительная вероятность ионизации RIP** по сравнению с азотом представлена в табл. 4.3.

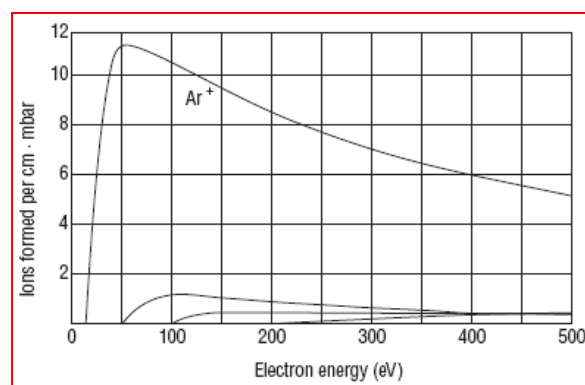
Элемент	Номер	Атомный номер	Частота
H	1	1	99.985
		2	0.015
He	2	3	0.00013
		4	≈ 100.0
B	5	10	19.78
		11	80.22
C	6	12	98.892
		13	1.108
N	7	14	99.63
		15	0.37
O	8	16	99.759
		17	0.0374
		18	0.2039
F	9	19	100.0
Ne	10	20	90.92
		21	0.257
Na	11	22	8.82
		23	100.0
Al	13	27	100.0
		28	92.27
Si	14	29	4.68
		30	3.05
P	15	31	100.0
S	16	32	95.06
		33	0.74
		34	4.18
Cl	17	35	75.4
		36	0.016
Ar	18	37	24.6
		38	0.337
Kr	36	40	99.60
		78	0.354
		80	2.27
Xe	54	82	11.56
		83	11.55
		84	56.90
		86	17.37
Xe	54	124	0.096
		126	0.090
		128	1.919
		129	26.44
		130	4.08
		131	21.18
Xe	54	132	26.89
		134	10.44
		136	8.87

Таблица 4.2 Частота изотопов.

4) в результате молекулы газа часто разбиваются на фрагменты при ионизации. **Распределение фрагментов**, созданных таким методом, является так называемой характеристикой спектра (метод отпечатка пальца, дробление осколков).

Часто возможное парциальное давление для одной массы будет определяться через критический (тщательный) анализ спектра. Т.к. давление воздуха в вакуумной камере (что может означать течь) проявляется через определение количества  $O_2^+$  (с массой 32), которое составляет около четверти  $N_2^+$  с массой 28. Если, с другой стороны, в спектре не определяется кислород, тогда пик с атомным номером 28 будет оксид углерода 28. Поскольку пик при атомном номере 28 соответствует фрагменту  $CO^+$  от  $CO_2$  (атомное число 44), эта доля составит 11% от измеренного значения для атомного номера 44 (табл.4.5). С другой стороны во всех случаях, когда присутствует азот, атомное число 14 ( $N_2^{++}$ ) будет всегда обнаруживаться в спектре в дополнение к атомному числу 28 ( $N_2^+$ ), с другой стороны в случае присутствия  $CO$  всегда будет появляться в дополнение к  $CO^+$  фрагментарные массы 12  $C^+$  и 16  $O_2^{++}$ .

**Важно:** в таблице отдельные характерные фрагменты стандартизированы или относительно максимального пика (в % или ‰ от наивысшего пика) или относительно всех пиков (см. примеры в табл. 4.4).



Пороговая энергия для ионов Ar:  
 $Ar^+$  15,7 эВ,  $Ar^{++}$  43,5 эВ,  $Ar^{3+}$  85,0 эВ,  $Ar^{4+}$  200 эВ

Рисунок 4.13. Количество различных ионов Ar в зависимости от уровня энергии электрона

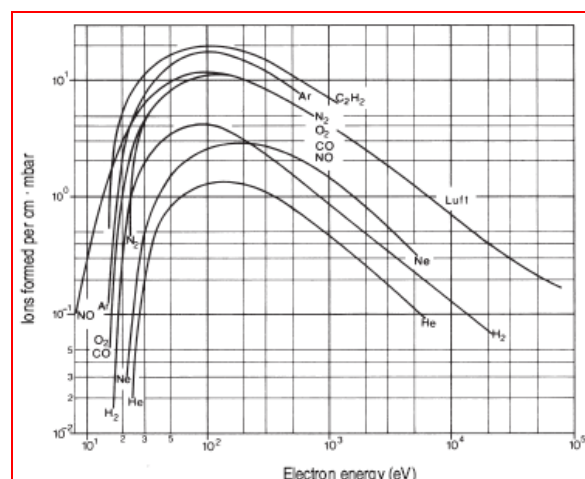


Рисунок 4.14. Удельная ионизация  $S$  для различных газов при уровне энергии электронов  $E$

На рис. 4.15 приведен пример модели спектра с наложением водорода, азота, кислорода, паров воды, угарного газа CO, углекислого газа CO<sub>2</sub>, неона и аргона для демонстрации сложности исследования спектра.

Газ	Символ	RIP	Газ	Символ	RIP
Ацетон (пропанон)	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	3.6	хлористый водород	HCl	1.6
Воздух		1.0	Фторо водород	HF	1.4
Аммиак	NH <sub>3</sub>	1.3	Иодистый водород	HI	3.1
Аргон	Ar	1.2	Сероводород	H <sub>2</sub> S	2.2
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	5.9	Йод	I <sub>2</sub>	
Бензойная кислота	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> COOH	5.5	Криптон	Kr	1.7
Бром	Br	3.8	Литий	Li	1.9
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	4.9	Метан	CH <sub>4</sub>	1.6
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	1.4	Метанол	CH <sub>3</sub> OH	1.8
Сероуглерод	CS <sub>2</sub>	4.8	Неон	Ne	0.23
Угарный газ	CO	1.05	Азот	N <sub>2</sub>	1.0
четырёххлористый углерод	CCl <sub>4</sub>	6.0	Оксид азота	NO	1.2
Хлорбензол	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl	7.0	Диоксид азота	N <sub>2</sub> O	1.7
Хлорэтан	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	4.0	Кислород	O <sub>2</sub>	1.0
Хлороформ	CHCl <sub>3</sub>	4.8	n-пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	6.0
Хлорметан	CH <sub>3</sub> Cl	3.1	Фенол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	6.2
Циклогексан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	6.4	фосфин,	PH <sub>3</sub>	2.6
Дейтерий	D <sub>2</sub>	0.35	Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	3.7
Дихлордифторметан	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	2.7	Перхлорат серебра	AgClO <sub>4</sub>	3.6
Дихлорметан	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	7.8	Иодид олова	SnI <sub>4</sub>	6.7
Динитробензол	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	7.8	Диоксид серы	SO <sub>2</sub>	2.1
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.6	Элегаз	SF <sub>6</sub>	2.3
Этанол	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	3.6	Толуол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	6.8
Этиленоксид	(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> O	2.5	тринитробензол	C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> (NO <sub>2</sub> ) <sub>3</sub>	9.0
Гелий	He	0.14	Пары воды	H <sub>2</sub> O	11.0
Гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	6.6	Ксенон	Xe	3.0
Водород	H <sub>2</sub>	0.44	Ксилол	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	7.8

Таблица 4.3. Относительная вероятность ионизации RIP относительно азота, энергия электронов 102 эВ.

Энергия электронов			75 эВ (PGA 100)		102 эВ (Transpector)	
Газ	Символ	Масса	Σ = 100 %	Макс. пик= 100 %	Σ = 100 %	Макс. Пик= 100 %
Аргон	Ar	40	74.9	100	90.9	100
		20	24.7	33.1	9.1	10
		36				0.3
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	45	0.95	1.3	0.8	1
		44	72.7	100	84	100
		28	8.3	11.5	9.2	11
		16	11.7	16.1	7.6	9
		12	6.15	8.4	5	6
Угарный газ	CO	29	1.89	2.0	0.9	1
		28	91.3	100	92.6	100
		16	1.1	1.2	1.9	2
		14	1.7	1.9		0.8
Неон	Ne	12	3.5	3.8	4.6	5
		22	9.2	10.2	0.9	11
		20	89.6	100	90.1	100
Кислород	O <sub>2</sub>	10	0.84	0.93	9	4
		34	0.45	0.53		
		32	84.2	100	90.1	100
Азот	N <sub>2</sub>	16	15.0	17.8	9.9	11
		29	0.7	0.8	0.9	1



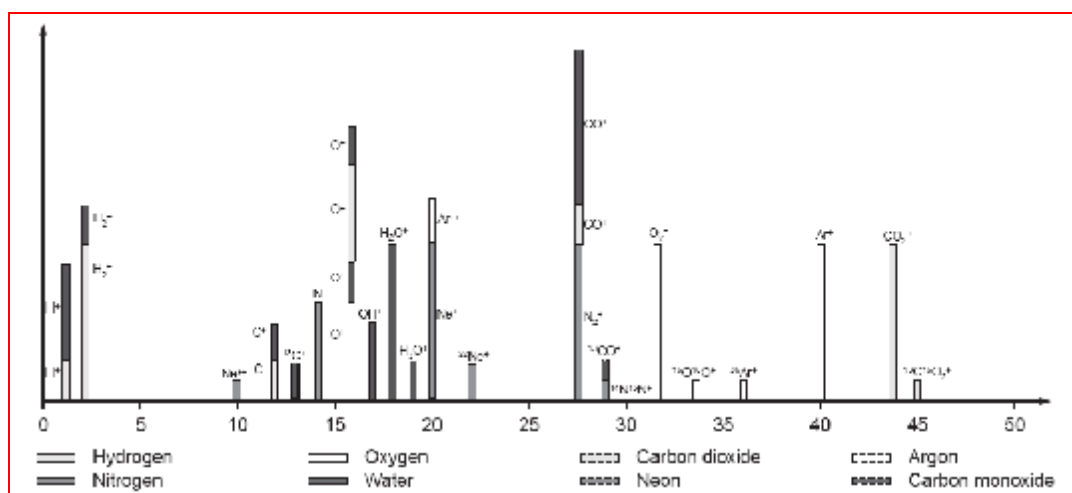
		28	86.3	100	92.6	100
		14	12.8	15	6.5	12
Пары воды	H <sub>2</sub> O	19	1.4	2.3		
		18	60	100	74.1	100
		17	16.1	27	18.5	25
		16	1.9	3.2	1.5	2
		2	5.0	8.4	1.5	2
		1	15.5	20	4.4	6

Таблица 4.4. Распределение фрагментов некоторых газов при энергии 75 и 102 эВ



№	Газ	Символ	1 = 100	2	3	4	5	6
1	Ацетон	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	43/100	15/42	58/20	14/10	27/19	42/8
2	Воздух		28/100	32/27	14/6	16/3	40/1	-
3	Аммиак	NH <sub>3</sub>	17/100	16/80	15/8	14/2	-	-
4	Аргон	Ar	40/100	20/10	-	-	-	-
5	Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78/100	77/22	51/18	50/17	52/15	39/10
6	Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	44/100	28/11	16/9	12/6	45/1	22/1
7	Угарный газ	CO	28/100	12/5	16/2	29/1	-	-
8	Четыреххлористый углерод	CCl <sub>4</sub>	117/100	119/91	47/51	82/42	35/39	121/29
9	уголь, угольный электрод	CF <sub>4</sub>	69/100	50/12	31/5	19/4	-	-
10	Масло дифф. насосов, DC 705		78/100	76/83	39/73	43/59	91/32	-
11	Масло дифф. насосов, Fomblin		69/100	20/28	16/16	31/9	97/8	47/8
12	Масло дифф. насосов, PPE		50/100	77/89	63/29	62/27	64/21	38/7
13	Этанол	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	31/100	45/34	27/24	29/23	46/17	26/8
14	галоидуглерод 11	CCl <sub>3</sub> F	101/100	103/60	35/16	66/15	47/12	31/10
15	галоидуглерод 12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	85/100	87/32	50/16	35/12	-	-
16	галоидуглерод 13	CClF <sub>3</sub>	69/100	85/15	50/14	31/9	35/7	87/5
17	галоидуглерод 14	CF <sub>4</sub>	69/100	12/7	19/6	31/5	50/8	-
18	галоидуглерод 23	CHF <sub>3</sub>	51/100	31/58	69/40	50/19	52/1	21/1
19	галоидуглерод 113	C <sub>2</sub> C <sub>13</sub> F <sub>3</sub>	101/100	103/62	85/55	31/50	151/41	153/25
20	Гелий	He	4/100	-	-	-	-	-
21	Гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	43/100	41/62	29/49	27/40	57/34	71/28
22	Гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	41/100	43/92	57/85	29/84	27/65	56/50
23	Водород	H <sub>2</sub>	2/100	1/5	-	-	-	-
24	Сероводород	H <sub>2</sub> S	34/100	32/44	33/42	36/4	35/2	-
25	Изопропиловый спирт	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	45/100	43/16	27/16	29/10	41/7	39/6
26	Криптон	Kr	84/100	86/31	83/20	82/20	80/4	-
27	Метан	CH <sub>4</sub>	16/100	15/85	14/16	13/8	1/4	12/2
28	Метиловый спирт	CH <sub>3</sub> OH	31/100	29/74	32/67	15/50	28/16	2/16
29	метилэтилкетон	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	43/100	29/25	72/16	27/16	57/6	42/5
30	Масло механ. Насоса		43/100	41/91	57/73	55/64	71/20	39/19
31	Неон	Ne	20/100	22/10	10/1	-	-	-
32	Азот	N <sub>2</sub>	28/100	14/7	29/1	-	-	-
33	Кислород	O <sub>2</sub>	32/100	16/11	-	-	-	-
34	Перфтор керосин		69/100	119/17	51/12	131/11	100/5	31/4
35	Пер фтор- трибутиламин	C <sub>12</sub> F <sub>27</sub> N	69/100	131/18	31/6	51/5	50/3	114/2
36	Силан	SiH <sub>4</sub>	30/100	31/80	29/31	28/28	32/8	33/2
37	Тетрафторид	SiF <sub>4</sub>	85/100	87/12	28/12	33/10	86/5	47/5
38	Толуол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	91/100	92/62	39/12	65/6	45.5/4	51/4
39	Трихлорэтан	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>	97/100	61/87	99/61	26/43	27/31	63/27
40	Трихлорэтилен	C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>	95/100	130/90	132/85	97/64	60/57	35/31
41	Трифторметан	CHF <sub>3</sub>	69/100	51/91	31/49	50/42	12/4	-
42	Масло турбомолекулярного насоса		43/100	57/88	41/76	55/73	71/52	69/49
43	Пары воды	H <sub>2</sub> O	18/100	17/25	1/6	16/2	2/2	-
44	Ксенон	Xe	132/100	129/98	131/79	134/39	136/33	130/15

Таблица 4.5. Библиотека спектров 6 максимальных пиков для TRANSPECTOR



Трудности: пики при атомном номере 16 могут образовываться из-за фрагментов кислорода из CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO. Пики при атомном номере 28 от распределения N<sub>2</sub> а так же CO и CO как фрагментов CO<sub>2</sub>. Пики при 20 атомном номере 20 могут быть результатом одинарной ионизации неона и двойной ионизации аргона

Рисунок 4.15. Модель спектра



## 4.6.2 Измерение парциальных давлений

Число ионов  $i_{gas}^+$ , созданных из газа источником ионов, пропорционально току эмиссии  $i^-$ , удельной ионизации  $S_{gas}$ , коэффициенту геометрии  $f$ , описывающему путь ионизации внутри источника ионов, относительной вероятности ионизации  $RIP_{gas}$  и парциальному давлению газа  $p_{gas}$ . Это число созданных ионов по определению является произведением чувствительности газа  $E_{gas}$  на парциальное давление  $p_{gas}$ :

$$\begin{aligned} i_{gas}^+ (\text{образ.}) &= \\ &= i^- \cdot S_{gas} \cdot f \cdot RIP_{gas} \cdot p_{gas} = \\ &= E_{gas} \cdot p_{gas} \end{aligned}$$

т.к.  $RIP_{N_2} = 1$ ,

$$E_{N_2} = i^- \cdot S_{N_2} \cdot f,$$

и  $E_{gas} = E_{N_2} \cdot RIP_g$

Почти все газы образуют фрагменты во время ионизации. Чтобы получить количественную оценку необходимо учесть поток ионов фрагментов (соответствующие пики известным коэффициентом фрагментов FF) одного пика и рассчитать полный ионный поток таким образом:

$$\begin{aligned} i_{gas} (\text{образ.}) &= i_{gas, m_1}^+ + i_{gas, m_2}^+ + K = \\ &= \frac{i_{gas, m_1}^+}{BF_{gas, m_1}} = \frac{i_{gas, m_2}^+}{BF_{gas, m_2}} = K = E_{gas} \cdot p_{gas} \end{aligned}$$

Чтобы определить число ионов, достигающих ионной ловушки, необходимо умножить это число на коэффициент переноса  $TF(m)$ , который будет зависеть от массы, чтобы учитывать стабильность системы разделения для атомного номера  $m$  (аналогично тому, есть коэффициент определения для  $SEMP$ , который однако, уже содержится в  $TF$ ). Коэффициент переноса (ионно-оптического переноса) является соотношением измеренных (measured) ионов и образованных (produced) ионов:

$$p_{gas} = \frac{i_{gas, m_2}^+ (\text{образ.})}{BF_{gas, m_2} \cdot E_{gas}}$$

$$\Rightarrow p_{gas} = \frac{i_{gas, m_2}^+ (\text{измер.})}{BF_{gas, m_2} \cdot E_{gas} \cdot TF(m)}$$

И  $E_{gas} = E_{N_2} \cdot RIP_{gas}$ , и конечный результат будет таков:

$$p_{gas} = i_{gas, m_2}^+ (\text{измер.}) \quad (4.3)$$

$$\frac{1}{E_{N_2}} \cdot \frac{1}{BF_{gas, m_2} \cdot RIP_{gas} \cdot TF(m)}$$

Парциальное давление вычисляется из потока ионов, измеренного для определенных фрагментов путем умножения на два коэффициента. Первый коэффициент будет зависеть только от чувствительности сенсора по азоту, постоянной для прибора. Второй будет зависеть только от характерных свойств ионов.

Эти коэффициенты будут вводиться отдельно для приборов с прямым измерением парциального давления (по меньшей мере для разных типов ионов).

## 4.6.3 Качественный анализ газов

При анализе спектра принимаются несколько рабочих гипотез:

1. каждый тип молекул образует отдельный постоянный спектр масс или спектр фрагмента, который является характеристикой для этого типа молекул (отпечаток пальца, дробление осколка).
2. спектр газовой смеси будет таким же как и при линейном наложении спектров отдельных газов. Высота пиков будет зависеть от давления газа.
3. поток ионов для каждого пика пропорционален парциальному давлению каждого компонента, создающего этот пик. Ввиду того, что поток ионов пропорционален парциальному давлению, постоянная пропорциональности (чувствительность) изменяется в зависимости от рода газа.

Хотя эти предположения не всегда корректны (см. Robertson – Mass Spectrometry), они остаются полезными для работы.

При качественном анализе неизвестные спектры сравниваются с известными из библиоте-



ки спектров. Каждый газ точно определяется через свой спектр. Сравнение с данными из библиотеки является простым процессом распознавания. В зависимости от возможностей, сравнение может выполняться с использованием любого количества вспомогательных компонентов. Так, например, в соответствии с расположением, размеров и последовательностью пяти из 10 наивысших пиков. Обычно, сравнение возможно только после стандартизации спектра, путем установки высот наивысших линий равными 100 или 1000 (см. табл. 4.5).

Сравнение можно выполнить вручную на основании наборов таблиц (например, по книге A.Cornu и R. Massot: Compilation of Mass Spectral Data) или с помощью компьютера, что более эффективно, используя большие базы данных (Mass Spectral Data Base, Royal Society of Chemistry, Cambridge).

При проведении сравнения с помощью библиотек, необходимо обратить внимание на идентичность источников ионов или, хотя бы, идентичность используемой энергии электронного удара.

Все эти способности, однако, слишком детально разработаны для проблем, существующих в вакуумной технологии. Большинство продаваемых масс-спектрометров могут показывать на экране ряд библиотек спектров так, чтобы пользователь мог сразу видеть, может ли библиотека содержать измеряемый компонент. Обычно измеренный спектр является результатом смеси газов и особенно удобно, если на экране можно вычесть (как следы) спектры отдельных газов из измеренного спектра. Газ может присутствовать только когда вычитание не приведет к отрицательному значению для главных пиков. На рис. 4.16 показана пошаговая процедура вычитания в программном обеспечении Transpector-Ware.

Несмотря на то, как проведен качественный анализ, результатом всегда будет только суждение, предположение о том, какие газы могут содержаться в смеси. Это суждение придется еще проверить, т.е. определить содержание в спектре тех или иных веществ. В дополнение запись нового спектра для этого вещества поможет внести ясность.

#### 4.6.4 Количественный анализ газов

Наиболее трудно приходится при интерпретации спектров смесей неизвестных газов. Можно установить пропорции потока ионов от различных источников относительно друг дру-

га только после идентификации всех источников. В большинстве областей применения вакуумной технологии можно иметь дело со смесями нескольких известных простых газов с атомным номером менее 50 (посредством чего технологические газы можно представить как исключение). Обычно, наиболее сложными будут спектры с множеством наложений в полностью неизвестной смеси газа из нескольких компонентов; в этой ситуации перед проведением количественного анализа придется сделать качественный. Степень сложности будет зависеть от количества наложений (отдельное / несколько / множество).

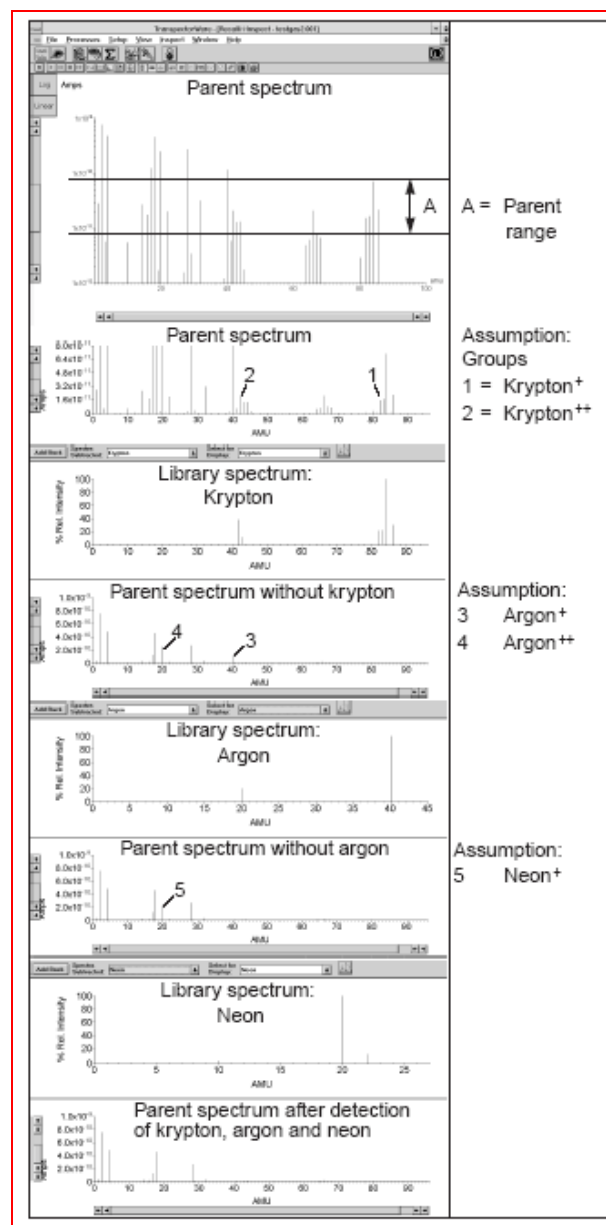


Рисунок 4.16. Вычитание спектра, содержащегося в библиотеке

Для отдельного наложения во время измерения течет общий, балансирующий ион, и часто для одного газа можно продуцировать несколько атомных чисел.

Когда имеется большое число наложений и ограниченное количество общих газов, может быть полезным табличное определение, использующее коэффициенты для спектра калибровочного газа, состав которого известен.

В большинстве случаев большинство газов будут создавать большее или меньшее распределение потока масса для всех масс. Доля газа  $g$  в каждом случае для атомного номера  $m$  будет выражаться через коэффициент фрагмента  $F_{fm,g}$ . Чтобы упростить расчеты коэффициент фрагментов  $F_{fm,g}$  будет так же содержать коэффициент переноса  $TF$  и коэффициент определения  $DF$ . Тогда ток ионов для массы  $m$  как функция общего тока ионов всех присутствующих газов в виде матрицы будет:

$$\begin{bmatrix} i_m^+ \\ i_n^+ \\ i_o^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BF_{1,k} & \dots & \dots & \dots & BF_{1,o} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & FF_{m,g} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ BF_{o,k} & \dots & \dots & \dots & BF_{o,o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_k^+ \\ \dots \\ I_g^+ \\ \dots \\ I_o^+ \end{bmatrix}$$

Вектор ионного тока для атомного номера  $m$  (результат от распределения фрагментов отдельных газов) равен матрице фрагментов, умноженной на вектор суммы потоков для отдельных газов:

$$\text{или } i_m^+ = \sum_{q=k}^o BF_{m,g} \cdot I_g^+$$

(в простом выражении:  $i = FF \cdot I$ ),

где  $i_m^+$  - вектор потока ионов для атомного номера в результате распределения фрагментов различных отдельных газов.

$$\sum_{g=k}^o BF_{m,g} = \text{фрагмент матрицы.}$$

$i_g^+$  = вектор суммы потоков для отдельных газов или:

$$i_m^+ = \sum p_g \cdot E_{N_2} \cdot RIP_g \cdot FF_m \cdot TF_m$$

где

$p_g$  – парциальное давление газа,

$E_{N_2}$  – чувствительность по азоту (постоянная),

$RIP_g$  – относительная вероятность ионизации газа,

$FF_m$  – коэффициент фрагментов,

$TF_m$  – коэффициент передачи для массы  $m$ .

Видно, что поток ионов, создаваемых газом, пропорционален парциальному давлению. Система линейных уравнений может быть решена только для характерного случая, когда  $m = g$  (квадратная матрица), это установлено для  $m > g$ . Из-за неизбежных ошибок измерения (помех) не устанавливается общий поток ионов  $i_g^+$  (парциальное давление или концентрация), что точно описывается системой уравнений. Среди всех возможных решений необходимо идентифицировать установленный  $i_g^{+*}$ , который после обратных расчетов парциального потока ионов  $i_m^{+*}$  будет выражать минимальное квадратичное отклонение от точно измеренного парциального ионного тока  $i_m^+$ . Следовательно:

$$\sum (i_m^+ - i_m^{+*})^2 = \min$$

Эта проблема минимизации математически идентична решению другой системы уравнений:

$$FFT \cdot i = FFT \cdot FF^T \cdot I$$

которая может вычисляться прямо на компьютере. Вектор ионного тока для отдельных газов определяется как:

$$I = \frac{[FF^T \cdot i] \cdot [FF^T \cdot BF]^{-1}}{\det[FF^T \cdot BF]}$$

## 4.7 Программное обеспечение

### 4.7.1 Стандартное SQX программное обеспечение (DOS) для автономной работы (1MS plus, 1PC, RS232)

Удобный пакет программного обеспечения SQX содержит стандартные операции для работы с масс-спектро-метром MS – различное описание спектра, требуемое для отдельных каналов с соответствующими эк-





ранами для отображения таблиц, графиков, переходов парциального давления, общей тенденции, сравнения со спектрами из библиотеки (с возможностью вычитания спектра, взятого из библиотеки), режима поиска течей и т.п., а так же балансировкой сенсора. Использование компьютера и дисплея дает возможность сохранения, обработки, печати данных и т.п. Характеристикой обычного пакета программ является то, что отдельный измеряемый спектр, даже если процесс измерения полностью автоматизирован, происходит в указанное время. Спектры этого типа могут быть только моментальным снимком процесса во времени.

#### 4.7.2 Программное обеспечение MQX (1...8 MS plus, 1PC, RS485)

Первый шаг в направлении ориентированного на процесс программного обеспечения от INFICOM – MQX. Делает возможным одновременный мониторинг за 8 сенсорами., тогда как в программе SQX все функции применимы к одному сенсору.

#### 4.7.3 Программное обеспечение Transpector-ware для Windows

«Inspector-ware» основано на совершенно новой философии. Во время процесс протекает в соответствии с технологической картой, параметры которой выставлены заранее. В этом случае данные непрерывно сохраняются – как отдельные кадры в видео. Впоследствии их можно сохранить где угодно, или обработать. Возможно анализировать интересующие стадии процесса во время процесса или после его завершения без необходимости прерывания процесса измерения. Когда происходит непрерывный мониторинг отдельных процессов, программа может создавать статистические данные (расчет средних значений, стандартных отклонений), из которых можно выделить пропускную способность для благоприятных рабочих процессов. При превышении предельных значений создаются сообщения об ошибках.

#### 4.7.4 Разработка программного обеспечения Transpector-view

Это программное обеспечение используется для расширения пользовательских программ для конкретных случаев. Основано на пакете LabView и включает драйверы (управляющие

программы), необходимые для работы Transpector.

### 4.8 Регулирование парциального давления

Некоторые технологические процессы, такие как процессы реактивного распыления/напыления, требуют постоянного возможного снижения скоростей для молекул реагирующих газов на покрываемой подложке.

Скорость снижения идентична скорости соударений, обсуждавшейся в разделе 1, она прямо пропорциональна парциальному давлению. Простейшей попыткой удержания постоянного парциального давления компонента газа является производительность (откачка) через регулирование с помощью расходомера (контроллера потока). Недостатком является тот факт, что регулятор не может определить изменения подачи и состава газа в вакуумной камере. Лучшей и более эффективной опцией является управление парциальным давлением с использованием масс-спектрометра через клапан подачи газа. Здесь значительные пики исследуемого газа распределяются по каналам в масс-спектрометре. Подходящие регуляторы сверяют аналоговые выходные сигналы для этих каналов с установленными значениями и выводят разницу между намеченным и действующим значениями для каждого канала для соответствующего клапана подачи газа. Конфигурация такого рода реализуется в управлении 6 каналами в QUADREX PPC. Можно установить клапан подачи газа, подходящий к прибору.

Газ, используемый для измерения скорости соударений (парциального давления) должен быть подан из точки в вакуумной камере. При определении постоянной времени для контура регулирования этого типа важно учитывать все аспекты времени, а не только время распространения электрического сигнала и обработки в масс-спектрометре, а так же постоянные времени вакуумной технологии и скорости потоков, как показано на рис. 4.17. Преобразователи давления или неудачно установленные трубопроводы подачи газа, соединенные с клапанами управления и вакуумной камерой будут приводить к сильному распределению постоянной времени. Обычно лучше установить желаемое соотношение S/N с большим сигналом (т.е. через большую диафрагму с большим отверстием) чем с длительными периодами интеграции для отдельных каналов. На рис. 4.18 представлены эффекты наддува давления и удлинения времени интеграции определения сигнала. На рис. а, b и c только время интеграции увеличилось



с 0,1 до 1,0 и 10 секунд (т.е. общий коэффициент 100) соответственно. При сравнении в последовательности a-d-e-f при постоянном времени интеграции общее давление поднялось в 3 шага с  $7,2 \cdot 10^{-6}$  до  $7,2 \cdot 10^{-5}$  мбар (коэффициент только 10).

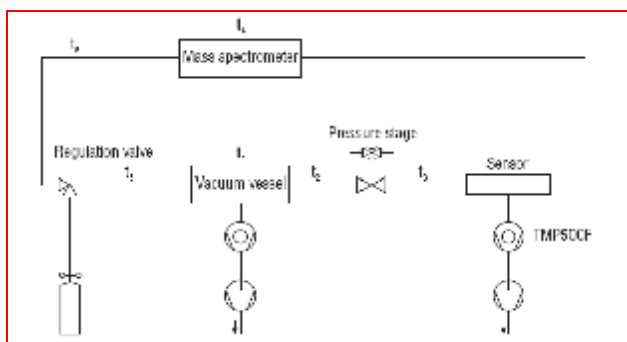


Рисунок 4.17. Временные константы отдельных частей

## 4.9 Техническое обслуживание

(ресурс катода, балансировка сенсора, очистка источника ионов и системы стержней)

**Балансировка сенсора** на оси масс (часто ошибочно называемая калибровкой) осуществляется очень просто с помощью программного обеспечения и может наблюдаться прямо на экране. Обычно определяется не только выравнивание вдоль оси масс, но и разрешение и чувствительность (раздел 4.5).

**Чистить сенсор** будет необходимо только в исключительных случаях, когда он сильно загрязнится. Обычно достаточно очистить источник ионов, который можно легко демонтировать и очистить. Систему стержней мож-

но очистить в ультразвуковой ванне после демонтажа. Если демонтаж системы нежелателен из-за сильного загрязнения, тогда настройку стержней, которая потребуется после, придется выполнять в заводских условиях.

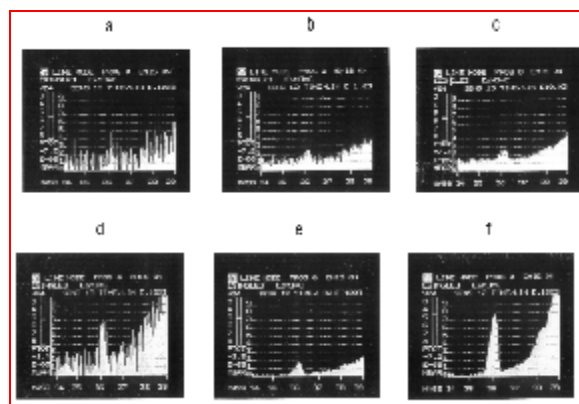


Рисунок 4.18. Улучшение соотношения сигнал/помехи через повышение давления или увеличение времени

Поддержание **ресурса катода** будет зависеть в основном от природы нагрузки. Опыт показывает, что произведение рабочего периода и рабочего давления может служить мерой нагрузки. Высокое рабочее давление (в диапазоне  $1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$  мбар) оказывает самое разрушающее влияние на ресурс, такое как, например, влияние некоторые химическое охладителей. Заменить катод легко благодаря простоте конструкции сенсора. Желательно, однако, иметь возможность заменить или очистить источник ионов.

## 5 Течеискание

Не говоря о вакуумных системах и отдельных компонентах, используемых в них (вакуумные камеры, трубопроводы, клапаны, фланцевые соединения, измерительные приборы и т.п.), существует большое количество других систем и компонентов, используемых в промышленности и при проведении исследовательских работ, которые должны отвечать жестким требованиям по герметичности соединений (уплотнений). Среди них существует много компонентов и процессов в автомобильной, холодильной и других отраслях промышленности. Рабочее давление в большинстве случаев часто превышает атмосферное. Здесь герметичность уплотнения воспринимается только как отсутствие течи. Часто используемые утверждения, такие как «нет определяемых течей» или «нулевой уровень течи» не обеспечивают адекватной основы для приёмочных испытаний. Каждый опытный инженер знает, что корректно сформулированные характеристики приема будут указывать на некоторый уровень течи (раздел 5.2) в определенных условиях. Каждый принимаемый уровень течи так же определяется его применением.

### 5.1 Типы течей

Следует различать следующие типы течей в зависимости от **природы материала или соединения**:

- \* течи в разборных соединениях (фланцы, состояния поверхности компонентов соединения, покрытия).
- \* течи в неразборных соединениях (места припоя, сварки, клеевые соединения).
- \* течи из-за пористости материала, особенно в следствие механической деформации (изгибов) и тепловых процессов поликристаллических материалов и компонентов отливок.
- \* тепловые течи (обратимые), возникающие при внешних тепловых нагрузках (нагрев-охлаждение), особенно в местах пайки.
- \* виртуальные течи - некоторое количество газа будет высвобождаться из полостей внутри отливок, глухих отверстий и соединений (а так же из-за испарения жидкостей).
- \* косвенные течи: течи трубопроводов подачи в вакуумных системах или печах (подача воды, сжатого воздуха или солевых растворов).
- \* последовательные течи, т.е. течи в конце нескольких последовательных соединений, например течи в секции масляного уплотнения пластинчато-роторного насоса.
- \* односторонние течи, которые позволят газу проходить только в одном направлении, и

герметичные в другом (очень редко встречаются).

Негерметичная область, которая временно не протекает из-за присутствия в ней дефекта, будет:

- \* проницаема для газа через такие материалы, как резиновые компоненты, уплотнения из эластомеров и т.п. (по мере того, как эти компоненты станут хрупкими и начнут пропускать).

### 5.2 Уровень течи, размер течи, поток

Вакуумные устройства или системы не могут быть полностью герметичными, да и в том нет необходимости. Простым примером будет уровень течи, который будет достаточно низким по сравнению с требуемым рабочим давлением, газобалластом и не окажет влияния на предельное давление в вакуумной системе. Из этого следует, что требования, несмотря на негерметичность системы, будут удовлетворяться. Чтобы иметь возможность регистрировать течи качественно, вводится понятие уровня течи  $Q_L$ , измеряемого мбар·л/с или см<sup>3</sup>/с (STP). Уровень течи  $Q_L = 1 \text{ мбар} \cdot \text{л} / \text{с}$  присутствует тогда, когда в замкнутом, откачанном объеме 1 л давление поднимется на 1 мбар за 1 секунду, или когда избыточное давление в камере падает на 1 мбар. Уровень течи  $Q_L$ , определяемый как мера течи, обычно указывается в единицах измерения мбар·л/с.

С учетом уравнения состояния (1.7) можно рассчитать  $Q_L$  для данной температуры  $T$ , рода газа  $M$ , регистрируя его качественно как поток т.е. в единицах измерения давления. Получим выражение:

$$Q_L = \frac{\Delta(p \cdot V)}{\Delta t} = \frac{R \cdot T}{M} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (5.1)$$

где  $R = 83.14 \frac{\text{мбар} \cdot \text{л}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ ,

$T$  = температура, К,

$M$  = молярная масса газа, г/моль,

$\Delta m$  = масса, г,

$\Delta t$  = время, с.

Уравнение 5.1 используется:

- а) для определения массового расхода  $\Delta m / \Delta t$  для известного потока газа  $\Delta p \cdot V / \Delta t$  (см. 5.4.1)



б) для определения  $pV$  потока течи, когда известен массовый расход (см. пример)

Пример:

В системе охлаждения, использующей фреон R12, есть потери хладагента 1 г фреона в год (при 25°C). Каков уровень течи  $Q_L$ ? По уравнению 5.1 для  $M$  (R12)=121 г/моль:

$$Q_L = \frac{\Delta(p \cdot V)}{\Delta t} = \frac{83.14 \text{ мбар} \cdot \text{л} \cdot 298 \text{ К} \cdot 1 \text{ г}}{\text{моль} \cdot \text{К} \cdot 121 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot 1 \text{ год}} =$$

$$= \frac{83.14 \cdot 2.98 \cdot 10^2 \cdot 1}{121.1} \cdot \frac{\text{мбар} \cdot \text{л}}{3.15 \cdot 10^7 \text{ с}} = 65 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\text{мбар} \cdot \text{л}}{\text{с}}$$

Т.е. потери фреона составят  $Q_L = 6.5 \cdot 10^{-6} \text{ мбар} \cdot \text{л} / \text{с}$ . Согласно приближенным подсчетам для высоковакуумных систем, приведенным ниже, система охлаждения, приведенная здесь, может считаться очень герметичной. Дополнительные преобразования  $Q_L$  представлены в табл. 9.7а, б.

Можно использовать следующие приближенные оценки для качественной характеристики высоковакуумного оборудования:

Общий уровень течи  $< 10^{-6}$  мбарл/с, оборудование очень герметичное,  
 Общий уровень течи  $< 10^{-5}$  мбарл/с, оборудование достаточно герметичное,  
 Общий уровень течи  $< 10^{-4}$  мбарл/с, оборудование недостаточно герметичное.

Течь можно на деле ликвидировать с помощью насоса достаточной производительности. При этом предельное давление:

$$p_{\text{end}} = \frac{Q_L}{S_{\text{eff}}} \quad (5.2)$$

( $Q_L$  – уровень течи,  $S_{\text{eff}}$  – эффективная быстрота действия при давлении в камере). Когда  $S_{\text{eff}}$  достаточно большая, несмотря на значение уровня течи  $Q_L$ , всегда возможно достичь установленное заранее предельное давление  $p_{\text{end}}$ . На практике неограниченное увеличение быстроты  $S_{\text{eff}}$  приведет к увеличению затрат и превышению пределов (например, ограничение пространства, занимаемого системой).

Когда невозможно достичь желаемое предельное давление в системе, то это может быть вызвано двумя причинами: наличием

течей и/или процесса дегазации со стенок системы и уплотнений.

Для точного различия между этими причинами можно использовать анализ парциального давления с помощью масс-спектрометра или метод повышения давления. Т.к. метод повышения давления только докажет наличие течи без указания ее расположения, то рекомендуется использовать течеискатель, который поможет достаточно точно определить расположение течи.

Чтобы провести обзор соотношений между геометрическими размерами и соответствующим уровнем течи можно использовать следующую грубую оценку: отверстие диаметром 1 см в стенке вакуумной камеры близко к затвору. С одной стороны – атмосферное давление, а внутри – вакуум. Когда клапан случайно откроется, все молекулы в цилиндре диаметром 1 см и длиной 330 м за 1 секунду упадут в отверстие со сверхзвуковой скоростью (330 м/с).

Количество газа, втекающего в камеру, будет  $10^{13}$  мбар, умноженное на объем цилиндра (рис. 5.1). Результатом для отверстия диаметром 1 см будет уровень течи  $Q_L$   $2,6 \cdot 10^4$  мбарл/с. Если при идентичных условиях будет втекать гелий со скоростью звука 970 м/с, то  $Q_L$  гелия будет  $7,7 \cdot 10^4$  мбарл/с или поток  $pV$  втекающего газа будет больше в  $970/330=2,94$  раз. Эта большая чувствительность для гелия используется для определения течей с помощью гелия и широкого производства высокочувствительных гелиевых течеискателей (раздел 5.5.2).

На рис. 5.1 показано соотношение между уровнем течи и диаметром отверстия по воздуху с аппроксимацией значения  $Q_L$  (воздух)  $10^4$  мбарл/с для отверстия  $\varnothing 1$  см. В табл. показано, что когда диаметр отверстия меньше 1 мкм уровень течи станет  $10^4$  мбарл/с, т.е. достигнет значения, которое в вакуумной технологии представляет основные значения течи. Течь, уровень которой составляет  $10^{-12}$  мбарл/с, соответствует отверстию диаметром 1 Å (ангстрем), и является нижним пределом определения современных гелиевых течеискателей. Т.к. размер кристаллической решетки большинства твердых веществ составляет несколько Å, а диаметр наименьших молекул  $\text{H}_2$ ,  $\text{He}$  составляет около 1 Å, то последние проникающие в твердые вещества, и их всегда можно регистрировать метрологически с помощью гелиевого течеискателя. Это приводит к развитию калибровочных течей с очень малыми уровнями (5.5.2.3), что является измерением



герметичности, а не течи в смысле дефекта в материале или соединении. Оценки или измерения размеров атомов, молекул, вирусов, бактерий и т.п. часто приводят к употреблению повседневных терминов герметичности для воды или бактерий (табл. 5.1)

$\Delta p = 1013 \text{ мбар}, \text{ } \varnothing \text{ отверстия} = 1 \text{ см}$ Скорость газа = скорость звука = 330 м/с Объем/время $330 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{1^2 \cdot \pi}{4} \cdot \text{см}^2 = 25.95 \cdot 10^{+3} \frac{\text{см}^3}{\text{с}} = 25.95 \frac{\text{л}}{\text{с}}$ Количество/время $1013 \text{ мбар} \cdot 25.95 \frac{\text{л}}{\text{с}} = 2.63 \cdot 10^{+4} \approx 10^{+4} \frac{\text{мбар} \cdot \text{л}}{\text{с}}$	
Диаметр	Уровень течи, мбар.л/с
$10^{-2} \text{ м} = 1,0 \text{ см}$	$10^{+4}$
$10^{-3} \text{ м} = 1,0 \text{ мм}$	$10^{+2}$
$10^{-4} \text{ м} = 0,1 \text{ мм}$	$10^0 (1)$
$10^{-5} \text{ м} = 0,01 \text{ мм}$	$10^{-2}$
$10^{-6} \text{ м} = 1,0 \text{ мкм}$	$10^{-4}$
$10^{-7} \text{ м} = 0,1 \text{ мкм}$	$10^{-6}$
$10^{-8} \text{ м} = 0,01 \text{ мкм}$	$10^{-8}$
$10^{-9} \text{ м} = 1,0 \text{ нм}$	$10^{-10}$
$10^{-10} \text{ м} = 1,0 \text{ \AA}$ (ангстрем)	$10^{-12}$

Рисунок 5.1. Соотношения между уровнем течи и размером отверстия

### 5.2.1 Стандартная гелиевая течь

Для четкого определения течи характеристики давления необходимы превалирующего с одной стороны, и природы среды (вязкость или молярная масса). Термин стандартная гелиевая течь He Std становится привычным для обозначения часто встречаемых на практике ситуаций, когда тестирование проводится при использовании гелия с перепадом давления 1 бар между внешним (атмосферным) и внутренним (вакуум  $p < 1$  мбар). Чтобы обозначить предельный уровень при использовании гелия в стандартных гелиевых условиях, необходимо сначала привести реальные условия к условиям использования гелия (раздел 5.2.2). Некоторые примеры приведены на рис. 5.3.

### 5.2.2 Уравнения преобразования

При пересчете отношений давлений и типов газов (вязкостей) необходимо иметь различные уравнения для использования в лами-

На рис. 5.2 показаны пределы определения и причины наиболее часто используемых методов течеискусания.

Метод /критерий	Примечание	$Q_L$ мбар.л/с	Относительный размер частиц
водонепроницаемость *	капельки	$Q_L < 10^{-2}$	
Проницаемость паров	запотевание	$Q_L < 10^{-3}$	
Проницаемость бактерий* (кокки) (палочки)		$Q_L < 10^{-4}$	$\approx 1$ мкм 0,5-1 мкм, 2-10 мкм в длину
Проницаемость масла		$Q_L < 10^{-5}$	
Проницаемость вирусов *		$Q_L < 10^{-6}$	
Вакцины (оспа)		$Q_L < 10^{-6}$	$\varnothing \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$
Маленькие вирусы		$Q_L < 10^{-8}$	$\varnothing \approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ м}$
Бактериофаги		$Q_L < 10^{-10}$	$\varnothing \approx 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}$
Вироиды, РНК		$Q_L < 10^{-10}$	
Проницаемость газов		$Q_L < 10^{-7}$	
Герметичность	техническая	$Q_L < 10^{-10}$	

В отличие от паров необходимо различать гидрофобные и гидрофильные вещества, это применимо для бактерий и вирусов, т.к. они переносятся в растворах

Таблица 5.1. Установление границ уровней течей

нарном и молекулярном режимах течения. Границу между этими областями очень сложно провести. В качестве рекомендации можно предположить, что при ламинарном потоке уровень течи будет при  $Q_L > 10^{-5}$  мбар.л/с, а при молекулярном уровне течи  $Q_L < 10^{-7}$  мбар.л/с. В промежуточном диапазоне производитель (ответственный за гарантийные обязательства) должен обеспечивать значения для обеспечения безопасности. Уравнения приведены в табл. 5.2.

Здесь индексы I и II относятся к одному или другому отношению давления, а индексы 1 и 2 соответствуют внутренним и внешним течам соответственно.

### 5.3 Термины и определения

При поиске течей решаются обычно две задачи:

1. расположение течи
2. измерение уровня течи.

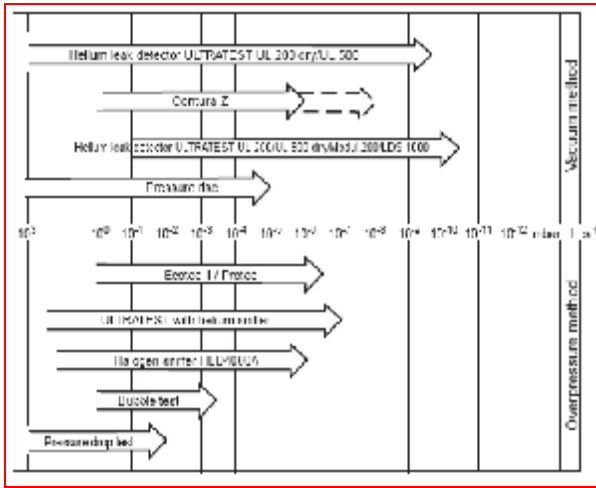


Рисунок 5.2. Уровни течей для разных методов и приборов

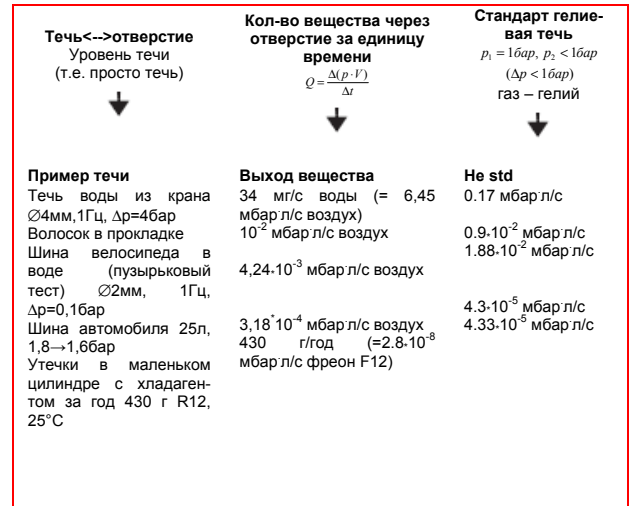


Рисунок 5.3. Примеры преобразования в стандартные течи гелия

Режим течения	Ламинарный	Молекулярный
Давление	$Q_1 \cdot (p_1^2 - p_2^2)_{II} = Q_{II} \cdot (p_1^2 - p_2^2)_I$	$Q_1 \cdot (p_1 - p_2)_{II} = Q_{II} \cdot (p_1 - p_2)_I$
Газ	$Q_{gas A} \cdot \eta_{gas A} = Q_{gas B} \cdot \eta_{gas B}$	$Q_{gas A} \cdot \sqrt{M_{gas A}} = Q_{gas B} \cdot \sqrt{M_{gas B}}$

Таблица 5.2. Формулы преобразования при изменении давления и рода газа

В дополнение выделим методы поиска течей на основании направления потока:

- а. **вакуумные методы** (течи снаружи), когда поток направлен внутрь исследуемого объекта (давление внутри объекта меньше атмосферного), и
- б. **методы избыточного давления** (течи наружу), когда поток направлен из исследуемого объекта наружу (давление внутри значительно больше давления окружающей среды).

Объекты следует по возможности проверять в конфигурации, соответствующей их дальнейшему применению: компоненты, работающие в вакуумных системах – с использованием вакуумных методов, а компоненты, которые будут находиться под давлением – методами избыточного давления.

При измерении уровня течи следует провести различие между регистрацией

- а. отдельных течей (**локальные измерения**, поз. b,d на рис. 5.4),
  - б. общих течей при испытании образца (**интегральные измерения**, поз а, с на рис. 5.4).
- Течи, которые не допустимы в соответствии с принятыми характеристиками, обозначаются как процент брака. Его расчет основан на условии, что тестируемый образец не может стать неисправным во время периода эксплуатации из-за неисправностей, вызванных наличием течей с некоторой достоверностью. Часто это не равняется уровню течи тестируемого образца в обычных установленных рабочих

условиях. Полученные значения приходится преобразовывать, чтобы привести их в соответствие с действительностью с учетом давления внутри и снаружи образца и типа использованного газа (жидкости).

Когда внутри испытываемого образца находится вакуум ( $p < 1 \text{ мбар}$ ), снаружи - атмосферное давление, а пробный газ – гелий, получаем **стандартные условия по гелию**. Эти условия всегда присутствуют во время проверки герметичности высоковакуумных систем, когда они подключаются к течеискателю, и в них подается гелий (**техника впрыскивания**). Если образец откачан только течеискателем, то можно сказать, что течеискатель работает в **режиме прямого потока**. Если образец является самостоятельной вакуумной системой со своими вакуумными насосами, и если течеискатель работает параллельно с насосами системы, то можно сказать что он работает в **режиме парциальных потоков** (противотока). Можно отметить, что при режим парциального потока использование дополнительного насоса считается как параллель к течеискателю.



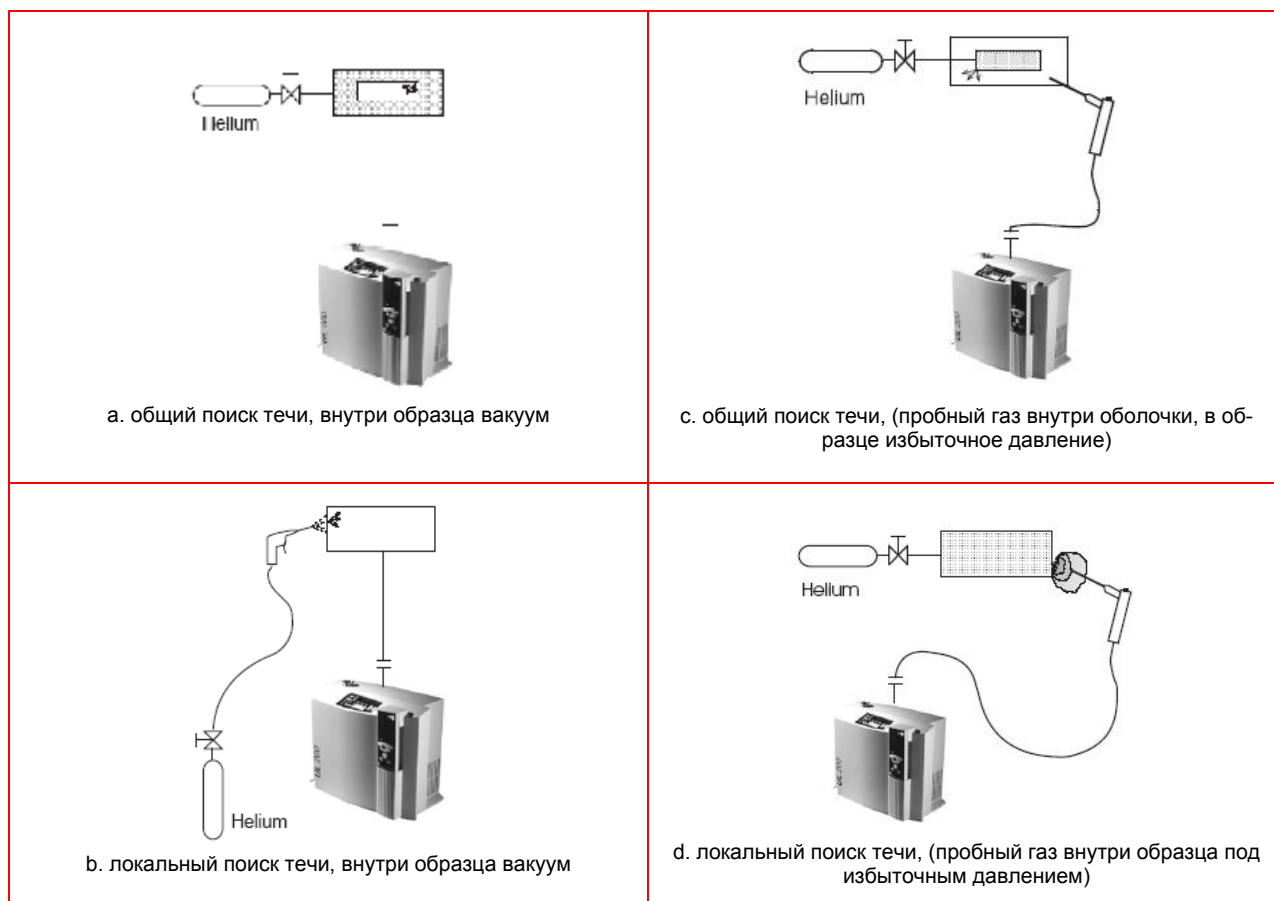


Рисунок 5.4. Методы и термины поиска течей

При использовании методов избыточного давления иногда невозможно или сложно измерить течь прямо тогда, когда она может быть обнаружена в среде/оболочке, окружающей исследуемый образец. Измерение можно выполнить, подключив оболочку к течеискателю или методом накопления газа (повышения концентрации) внутри оболочки. **Проверка бомбардировкой** является одним из видов метода накопления (раздел 5.7.4). В так называемой **технике щупа**, другом виде метода избыточного давления, газ, выходящий из течи, собирается (извлекается) специальным устройством и подается в течеискатель. Эта процедура может выполняться с использованием гелия, фреонов или элегаза SF<sub>6</sub> в качестве пробного газа.

## 5.4 Методы поиска течей без использования течеискателя

Наиболее значительное различие в методах определяется тем, используется течеискатель или нет.

В простейшем случае течь можно определить качественно и, используя несколько методов, количественно без помощи специального те-

чеискателя. Т.е. количество капающей из крана воды за некоторое время можно определить с помощью специального градуированного цилиндра, который едва ли можно назвать течеискателем. В тех случаях, когда уровень течи можно определить во время поиска без использования течеискателя (пример в разделе 5.4.1), это можно привести к стандартным условиям по гелию (раздел 5.2.1). Это стандартное значение течи часто необходимо при создании сертификатов, а так же может использоваться при сравнении со значениями, полученными с помощью гелиевых течеискателей.

Несмотря на тщательную проверку отдельных компонентов, течи могут присутствовать в системе в результате сборки, из-за пористости материалов уплотнителей или повреждения поверхностей уплотнений. Процессы, используемые при проверке системы, будут зависеть от размера течи, степени требуемой герметичности, материалов, из которых изготовлена система (стекло, металл, или другие материалы). Ниже описаны некоторые методы поиска течей. Они выбираются для использования в соответствии с практическим применением или экономическим фактором, который тоже может играть важную роль.

### 5.4.1 Тест повышения давления

Этот метод тестирования использует тот факт, что течь позволит газу (оставаясь постоянной в течении времени) попасть в хорошо откачанный объект (поток помех, рис. 1.1). В противоположность этому количество газа, высвобождающегося со стенок камеры и из материалов уплотнений (если нет достаточного обезгаживания) будет падать с течением времени, т.к. это почти всегда будет конденсируемый пар, для которого через некоторое время будет достигнуто давление равновесия (рис.5.5). Клапан на конце камеры, где находится насос, будет закрыт для подготовки измерения повышения давления. Затем измеряется время, в течении которого произошло повышение давления на некоторую величину (например в 10 раз). Клапан снова открывается и насос работает в течении некоторого времени, а затем процесс повторяется. Если время, за которое происходит одинаковое повышение давления, остается постоянным, значит, есть течь, учитывая тот факт, что между периодами повышения давления был достаточным. Длительность промежуточного периода будет зависеть от типа и размеров устройств. Если повышение давления сильно изменилось во время второй фазы, то повышение могло быть вызвано процессом дегазации внутренних поверхностей камеры. Можно так же попытаться установить различия между течью и загрязнением через построение кривой повышения давления. Вычерченная в линейных координатах, кривая повышения давления должна быть прямой при наличии течи даже при высоких давлениях. Если повышение давления вызвано процессом дегазации со стенок (в основном из-за загрязнений), то повышение давления будет неравномерным и в итоге достигнет постоянного значения. В большинстве случаев оба эти явления происходят одновременно, так что различить из очень трудно, почти невозможно. Эти отношения схематично показаны на рис. 5.5. после того, как выяснится, что повышение происходит из-за течи, тогда течь можно оценить количественно из повышения давления, построенного относительно времени в соответствии с уравнением:

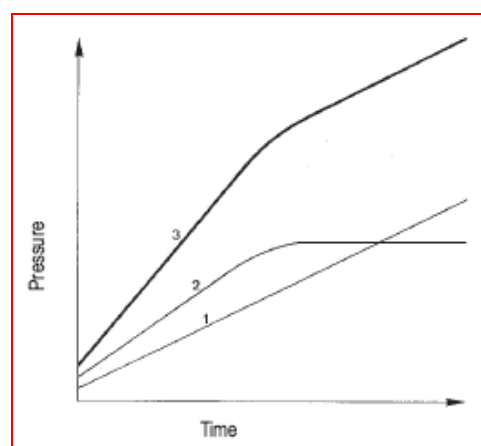
$$Q_L = \frac{\Delta p \cdot V}{\Delta t} \quad (5.3)$$

Пример: камера объемом 20 л отсоединена от насоса при проведении теста повышения давления от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-3}$  мбар за 300 с. Тогда течь по уравнению 5.2 составит:

$$Q_L = \frac{(1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4}) \cdot 20}{300} = \frac{9 \cdot 10^{-4} \cdot 20}{300} = 6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мбар} \cdot \text{л}}{\text{с}}$$

Уровень течи, выраженный как массовый расход  $\Delta m / \Delta t$  из уравнения 5.1 составит при  $Q_L = 6 \cdot 10^{-5} \text{ мбар} \cdot \text{л} / \text{с}$ ,  $T = 20^\circ \text{C}$ , для воздуха  $M = 29 \text{ г} / \text{моль}$ :

$$Q_L = \frac{\Delta m}{\Delta t} = 6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мбар} \cdot \text{л}}{\text{с}} \cdot 29 \frac{\text{г}}{\text{моль}} \cdot \frac{\text{моль} \cdot \text{К}}{83.14 \text{ моль} \cdot \text{л} \cdot 293 \cdot 10^2 \text{ К}} = 7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{г}}{\text{с}}$$



1. течь
2. дегазация со стенок
3. течь + дегазация

Рисунок 5.5. Повышение давления в камере после отключения насоса

Если, к примеру, камера откачивалась с помощью турбомолекулярного насоса TURBO-VAC50 ( $S = 50 \text{ л} / \text{с}$ ), присоединенному к камере через затвор, так что эффективная быстрота действия будет  $S_{\text{eff}} = 30 \text{ л} / \text{с}$ , тогда предельное давление:

$$p_{\text{end}} = \frac{Q_L}{S_{\text{eff}}} = \frac{6 \cdot 10^{-5} \text{ мбар} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}}{30 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ мбар}$$

Обычно можно увеличить это предельное давление, хотя незначительно, за счет использования насоса большей производительности (например TURBOVAC151) и при этом снизить время откачки, необходимое для достижения предельного давления.

Сегодня поиск течей в вакуумных системах обычно выполняется с использованием ге-



лиевых течеискателей и вакуумных методов (см. раздел 5.7.1). Системы откачиваются, пробный газ разбрызгивается снаружи. В этом случае необходимо обеспечить возможность определения (на основе взятия образца внутри системы) пробного газа, который через течи попадает в систему. Другим способом является метод избыточного давления. Пробный газ (гелий) используется для заполнения исследуемой системы до давления чуть выше атмосферного. Тогда газ будет выходить через течи наружу и обнаруживаться вне системы. Течи обнаруживаются с помощью спреев течи (или метода обнаружения течи газа мыльным раствором, 5.4.5) или при использовании  $H_2$  или  $He$  в качестве пробного газа с помощью течеискателей или щупов (5.7.2)

#### 5.4.2 Тест понижения давления

Можно провести аналогию с методом повышения давления (раздел 5.4.1). Однако этот метод редко используется для поиска течей в вакуумных системах. Если, несмотря ни на что, этот метод используется, то избыточное давление не должно быть больше 1 бар, т.к. фланцевые соединения, используемые в вакуумной технологии, не выдерживают высокое давление. С другой стороны, метод избыточного давления является более востребованным в ряде областей. Эти методы необходимы для понижения давления при работе с большими емкостями и при длительном периоде испытаний, где при некоторых условиях может быть необходимым учитывать влияние изменения температуры. Это может случиться, например, при охлаждении системы для понижения давления насыщения для паров воды, вызывающего конденсацию воды. Придется учитывать этот факт при оценке снижения давления.

#### 5.4.3 Поиск течей с использованием вакуумметров, чувствительных к роду газа

Тот факт, что показания давления вакуумметров (раздел 3.3) чувствительны к роду газа, можно использовать при поиске течей. Можно обработать места предполагаемых течей спиртом. Пары спирта, которые будут попадать в объем (теплопроводность и способность к ионизации значительно выше, чем у воздуха), будут влиять на показания давления в большей или меньшей степени. Присутствие большего количества частиц, легкость использования гелиевого течеискателя, делают этот метод почти полностью непригодным.

#### 5.4.4 Метод погружения (пузырьковый метод)

Находящийся под давлением образец погружают в ванну, заполненную жидкостью. Всплывающие пузырьки указывают на наличие течи. Определение течи в основном будет зависеть от внимательности персонала, проводящего испытания и привлечения приманок для увеличения чувствительности за счет использования более высокой температуры относительно применимых требований безопасности, которыми иногда пренебрегают. Этот метод очень трудоемкий для маленьких течей, как показано в табл. 5.3. Системы охлаждения рекомендуется проверять на герметичность с помощью хладагента R12 (фреон). Здесь течь указывается как утечки фреона в грамм/год (г/г). В качестве пробной жидкости используется вода (которая может быть нагрета или в которую может быть добавлены поверхностно-активные вещества ПАВ) или масло на основе нефти. Поверхностное натяжение жидкости не должно превышать 75 дин/см (1дин=10<sup>-5</sup> Н).

Фреон F12 утечки в год (г/г)	Время образования пузырьков (с)	Эквивалентный уровень течи (см <sup>3</sup> /с)	Время определения гелиевым течеискателем (с)
280	13.3	1.8·10 <sup>-3</sup>	Несколько секунд
84	40	5.4·10 <sup>-4</sup>	
28	145	1.8·10 <sup>-4</sup>	
14	290	9.0·10 <sup>-5</sup>	
2.8	24 мин	1.8·10 <sup>-5</sup>	
0.28 *	6 ч	1.8·10 <sup>-6</sup>	

\*) эта течь является предельной для хорошего галогенового течеискателя (0,1 г/г).

Таблица 5.3. Сравнение пузырькового метода с гелиевым течеисканием

#### 5.4.5 Метод нанесения (распыления) пены

В большинстве случаев находящиеся под давлением объемы или трубопроводы (включая трубопроводы подачи газа в вакуумных системах) могут проверяться на герметичность достаточно удобно путем окрашивания или нанесения растворов поверхностно-активных веществ на них. Метод нанесения пены так же является экономически выгодным. выходящий газ образует пузыри пены в местах течи. При определении маленьких течей этот метод будет трудоемким и будет зависеть от внимательности персонала. Системы охлаждения с водородом, используе-



мые в генераторах мощности представляют отдельный случай. Их действительно можно тестировать подобным образом, но более эффективно и с большей чувствительностью можно провести поиск течей водорода с помощью щупа гелиевого течеискателя, настроенного на ответ  $H_2$  (5.7.2).

#### 5.4.6 Проверка в вакуумной камере

В качестве разновидности метода нанесения пены, в котором выходящий газ образует пузырьки, можно отметить так называемую вакуумную камеру с уплотнением. Присоску, похожую на маску для подводного плавания, помещают на проверяемую поверхность, на которую нанесен мыльный (пенный) раствор. Затем эта присоска откачивается вакуумным насосом. Воздух, входящий снаружи через течи будет образовывать внутри камеры пузырьки, за которыми можно наблюдать через стекло на присоске. Этим способом возможно, например, проверять плоские металлические пластины на наличие течей. Присоски выпускаются для различных сфер применения и контуров поверхности.

#### 5.4.7 Радиоизотопный метод Кrypton 85

При работе с маленькими, герметичными частями, когда течет корпус, криптон 85 (газообразный изотоп) можно сначала подать в устройство под давлением. По истечении точно измеренного периода времени давление уменьшится, и будут измерены повышение компонента и активность «газового заряда». В качестве пробного газа можно использовать и гелий (5.7.4).

#### 5.4.8 Высокочастотные испытания

Так называемый высокочастотный вакуумный тестер можно использовать не только для проверки давления в стеклянных компонентах, но и для локализации областей наличия пор в металле, покрытом пластиком или окрашенном. Он состоит из ручного блока с высокочастотным электродом в виде щетки и блоком питания. Форма и цвет электрического газового разряда могут служить грубой индикацией давления, превалирующего внутри стеклянного компонента. В случае вакуумного тестера, который главным образом состоит из преобразователя /трансформатора Тесла

(который формирует высокочастотный переменный ток высокого напряжения) коронный разряд электрода, приближающегося к объекту, будет инициировать безэлектродный разряд внутри объекта. Интенсивность и цвет разряда будут зависеть от давления и рода газа. Явление светящегося разряда позволит дать предположение о приблизительном значении давления, превалирующем в объекте. Свечение разряда будет исчезать при высоком и низком давлении.

При поиске течей в стеклянных компонентах предполагаемые сечения (места) сканируются высокочастотным вакуумным тестером – электродом. При наличии течи будет зажигаться дуга между электродом и стеклянной стенкой. Этим методом можно обнаружить очень маленькие поры – течи. Коронный разряд вакуумного тестера может так же проникать через тонкие области в стекле, особенно в местах сварки и сопряжения компонентов. Герметичное оборудование после проверки этим методом может оказаться совсем не герметичным. Относительно других приборов для определения течей высокочастотный вакуумный тестер жестко ограничен в своих функциях.

#### 5.4.9 Люминесцентный метод (с использованием красителей)

Течи можно локализовать с помощью химических реакций, которые приведут к обесцвечиванию или проникновению виража (красящего раствора) в отверстия. Обесцвечивание пламени из-за выходящих из течей газов – галогенов использовалось ранее для определения течей в местах паек холодильников. Менее часто задействован химический эффект: при выходе через течь аммиака, при контакте с фотобумагой или с материалами, специально подготовленными и завернутыми вокруг внешней поверхности объекта, аммиак обесцвечивает бумагу.

Примером метода проникновения является проверка герметичности резиновой пробки или плунжера в стеклянной трубке, используемой при тестировании материалов, подходящих для шприцов или фармакологических упаковок. При появлении течей жидкости необходимо будет рассмотреть влажность поверхности твердого тела и действие капилляров (табл. 5.1). Сравнение наиболее широко используемых методов течеискания приведено в табл.5.4.



Метод	Пробный газ	Минимальная определяемый уровень течи Мбар л/с (r/l) R134 a		Диапазон давления	Количественные измерения
Пянящиеся жидкости	Воздух и другие	$10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-1}$	Избыточное давление	Нет
Ультразвуковой микрорфон	Воздух и другие	$10^{-2}$	70	Избыточное давление	Нет
Теплопроводные течеискатели	Газы, отличные от воздуха	$10^{-3} - 10^{-5}$	$10^{-1} - 7$	Избыточное давление и вакуум	Нет
Галогеновый течеискатель	Вещества, содержащие галогены	$10^{-6}$ ( $10^{-5}$ )	$7 \cdot 10^{-3}$ ( $10^{-1}$ )	Избыточное давление (вакуум)	Ограничено
Универсальный щуп течеискатель	Фреоны, Гелий и другие	$10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-3}$	Избыточное давление	Да
Гелиевый течеискатель	Гелий	$10^{-12}$ $10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-9}$ $7 \cdot 10^{-4}$	Вакуум, избыточное давление	Да
Пузырьковый	Воздух и другие	$10^{-3}$	7	Избыточное давление	Нет
Давления воды	Вода	$10^{-2}$	70	Избыточное давление	Нет
Понижение давления	Воздух и другие	$10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-1}$	Избыточное давление	Да
Повышение давления	Воздух	$10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-1}$	Вакуум	Да

Таблица 5.4. Сравнение методов течеискания

## 5.5 Течеискатели и принцип их работы

Большинство работ по поиску течей сегодня осуществляется с использованием специальных приборов - течеискателей. С их помощью можно обнаружить такие маленькие течи, которые невозможно обнаружить другими методами без использования специальных приборов. Все эти методы основаны на использовании особых газов для тестирования. Различия физических свойств пробных газов и газов, действующих в процессах или окружающих тестируемую систему, измеряются с помощью течеискателей. Это может быть, например, различная теплопроводность пробного газа и окружающего воздуха. Наиболее широко используется метод поиска течей с гелием в качестве пробного газа.

Работа большинства течеискателей основана на том, что тестирование связано с особым пробным газом, т.е. со средой, отличной от той, которая используется в обычных рабочих условиях. Поиск течей может быть связан с использованием гелия, который определяется масс-спектрометром, даже если исследуемым компонентом может быть, например, водитель ритма сердца, внутренние компоненты которого защищены от доступа жидкости во время обычной работы. Этот пример ясно показывает различия свойств потока среды испытаний и рабочей среды.

### 5.5.1 Галогеновый течеискатель (HLD 4000, D-TEC)

Газообразные химические вещества, молекулы которых содержат хлор или фтор (такие как хладагенты – фреоны R12, R22, R134a) будут влиять на выход щелочных ионов из поверхности, пропитанной смесью KOH и гидроксида железа (III) и поддерживаемой при температуре 800...900°C с помощью

внешнего платинового Pt нагревателя. Освобождаемые ионы направляются к катоду, где ионный ток измеряется, а затем усиливается (принцип галогенового диода). Этот эффект настолько велик, что парциальные давления галогенов можно измерять даже ниже  $10^{-7}$  мбар.

Несмотря на то, что такие приборы использовались в прошлом для поиска течей в соответствии с вакуумными методами, сегодня – из-за проблем, связанных с использованием фреонов CFC – больше используются приборы с щупами. Для таких приборов допустимый предел определения течи составляет  $1 \cdot 10^{-6}$  мбар л/с. Оборудование, работающее по принципу галогенового диода, может так же определять SF<sub>6</sub>. Щупы используются для определения мест выхода фреона из холодильников или из переключателей, заполненных газом SF<sub>6</sub> для подавления дуги.

### 5.5.2 Течеискатели с масс-спектрометрами MSLD

Определение пробного газа с использованием течеискателя является на сегодня наиболее чувствительным методом определения течей, широко применяемым в промышленности. MS течеискатели, разработанные для этих целей, делают возможным количественное измерение уровня течи в очень широком диапазоне (в несколько порядков – см. раздел 5.2), а нижний предел составляет  $\approx 10^{-12}$  мбар л/с, т.е. делает возможным демонстрацию проницаемости газами твердых тел при использовании гелия в качестве пробного газа. В принципе возможно определить все газы, используя масс-спектрометрию. Во всех возможных опциях, использование гелия как пробного газа обеспечивается исключительно практическими целями. Определение гелия с использованием масс-спектрометрии происходит абсолютно (!) четко. Гелий является химически инертным, не коррозионным,



нетоксичным, обычно присутствующим в воздухе с концентрацией только 5 ppm, и очень экономически выгодным газом. Сегодня в MSLD используются два типа масс-спектрометров:

- a) квадрупольный, хотя он используется менее часто из-за более сложной конструкции (в основном из-за электропитания сенсора)
- b) с сектором магнитного поля 180° из-за относительной простоты конструкции.

Несмотря на используемый принцип работы, каждый масс-спектрометр состоит из трех физически важных подсистем: источника ионов, системы разделения, ионной ловушки. Ионы должны иметь возможность перемещаться вдоль пути от источника до ловушки через систему разделения, по возможности, без соударения с молекулами газа. Длина этого пути составляет примерно 15 см для всех масс-спектрометров, и, следовательно, длина свободного пути молекул среды составляет около 60 см, что соответствует давлению около  $1 \cdot 10^{-4}$  мбар, т.е., другими словами, масс-спектрометр может работать только в вакууме. Т.к. минимальный уровень – вакуум  $1 \cdot 10^{-4}$  мбар/л/с, то необходим высокий вакуум. Турбомолекулярные и подходящие форвакуумные насосы используются в современных течеискателях. Соединенные в отдельные группы компоненты подключаются к электрическому и электронным системам питания через микропроцессоры, что дает большую степень автоматизации работы, включая настройку, калибровку и отображение измеряемых значений.

### 5.5.2.1 Принцип работы течеискателя MSLD

Основная функция течеискателя и отличие от масс-спектрометра объясняется с учетом рис. 5.6. На рис. 5.6. показана основная конфигурация течеискателя при использовании метода обдува гелием вакуумных компонентов (раздел 5.7.1). Когда распыляемый гелий попадает в компонент через течь, он откачивается через внутренние части течеискателя к выходу, где покидает течеискатель. Считается, что течеискатель герметичный, количество газа, протекающее через каждое сечение трубопровода (в любой точке) за единицу времени остается постоянным, независимо от поперечного сечения и длины трубопровода. Для входа в порт откачки вакуумного насоса применимо уравнение:

$$Q = p \cdot S \quad (5.4)$$

Во всех других точках применимо выражение

$$Q = p \cdot S_{eff} \quad (5.4.a)$$

с учетом потерь в трубопроводах.

Уравнение применимо ко всем газам, откачиваемым через трубопроводы, в том числе и для гелия.

$$Q_{He} = p_{He} \cdot S_{eff, He} \quad (5.4.b)$$

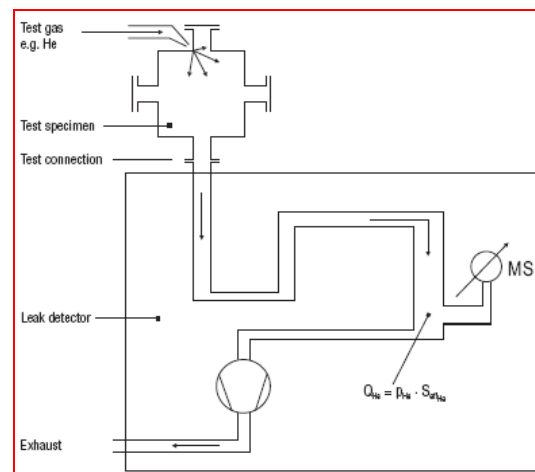


Рисунок 5.6. Принцип работы течеискателя

В этом случае количество газа за единицу времени является искомым уровнем течи. Общее давление может не использоваться, а только парциальное давление гелия. Этот сигнал подается масс-спектрометром, когда он установлен на атомный номер (массу) 4 – т.е. гелий. Значение для  $S_{eff}$  является постоянным для большинства течеискателей, делая возможным использование микропроцессора для умножения сигнала, приходящего от масс-спектрометра на цифровую константу, и прямого отображения уровня течи.

### 5.5.2.2 Пределы измерения, фон, газобалласт, подавление дрейфа точки нуля

Минимальный определяемый уровень течи зависит от естественного уровня фона определяемого газа. Даже при закрытом тестовом разъеме в течеискателе каждый газ будет проходить – в направлении откачки – через выход и через насосы (но будет снижаться с учетом их сжатия) через масс-спектрометр, где будет определяться, если электроника работает адекватно. Генерируемый сигнал формирует предел определения. Высоковакуумная система, используемая для откачки масс-спектрометра, обычно состоит из турбомолекулярного насоса и пластинчатороторного насоса с масляным уплотнением (ранее вместо турбомолекулярных использовались диффузионные насосы). Как любая

жидкость, уплотняющее масло в пластинчато-роторном насосе имеет способность растворения газов, пока не будет достигнуто состояние равновесия между газами, растворенными в масле и находящимися вне его. Когда насос горячий (при рабочей температуре), это состояние равновесия соответствует пределу определения течеискателя. Следовательно, гелий, растворенный в масле будет влиять на предел определения течеискателя. Возможна подача в течеискатель пробного газа не только через тестовое соединение, но и при ненадлежащей установке или неадекватной подаче через выхлопной порт, отверстие напуска газа или газобалластный клапан, что повысит уровень гелия в масле и уплотнениях из эластомера, что, в свою очередь, приведет к фоновому сигналу в масс-спектрометре, который будет выше обычного. Когда прибор установлен корректно (рис. 5.7), клапаны газобалласта и напуска воздуха будут подсоединены к чистому воздуху, а выхлопной трубопровод (масляный фильтр) следует направить вне помещения, где происходит поиск течей.

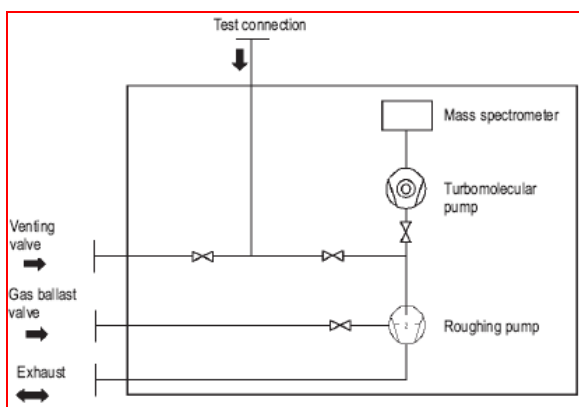


Рисунок 5.7. Корректная настройка для MSLD

Повышение уровня фона пробного газа (гелия) можно понизить путем открытия газобалласта и подачи газа, в котором не содержится пробный газ (чистый воздух). Растворенный гелий будет удален. Т.к. эффект всегда оказывает влияние только на часть масла, присутствующего в корпусе насоса в данный момент, процедура удаления (промывки) гелия будет продолжаться до тех пор, пока все масло из масляного резервуара не пройдет несколько циклов. Этот период может продолжаться 20-30 минут.

Чтобы избавить пользователя от необходимости всегда следить за уровнем фона, в концепции автоматической работы течеискателя INFICON (раздел 5.5.2.5) встроена функция **подавления плавающей точки нуля**. Здесь уровень фона, измеренный после закрытия входного клапана, хранится в памяти. Когда затем клапан снова откроется, это

значение будет автоматически пересчитано из последних измерений. Только при относительно высоком пороговом уровне будет отображаться панель с предупреждающим сообщением о том, что уровень фоновых помех слишком высокий. Рис. 5.8. служит иллюстрацией процессов, происходящих при подавлении нуля. Начнем анализ слева. Сигнал значительно больше фона. Картинка в центре – фон значительно повышен, сигнал можно едва различить. Картинка справа: фон электрически подавлен, сигнал снова четко виден.

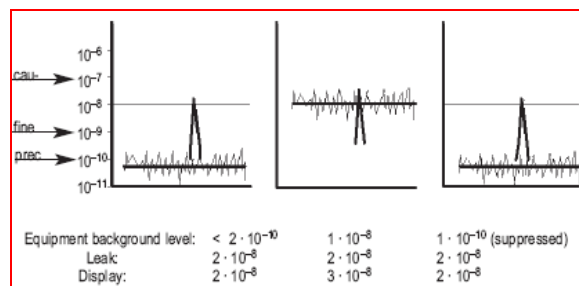


Рисунок 5.8. Пример подавления нуля.

Независимо от подавления плавающей точки нуля, все течеискатели имеют возможность ручной настройки точки нуля. При этом дисплей течеискателя в некоторый момент будет установлен на нуль, так что будет отображаться только повышение уровня течи от этой точки. Это обеспечивает только возможность выравнивания показания, но не может влиять на его точность.

Современные течеискатели все более часто снабжаются безмасляными системами откачки (так называемые сухие течеискатели UL200 dry, UL500 dry). В них нет проблемы растворенного в масле гелия, но в них используется похожая техника продувки.

### 5.5.2.3 Калибровка течеискателя, контрольные течи

Под калибровкой течеискателя понимается соответствие показания течеискателя, к которому присоединена контрольная (калибровочная) течь, значению, указанному на метке или в поверочном сертификате этой течи. Предварительным необходимым условием этому является корректная настройка пути иона в масс-спектрометре. Часто различия между процедурами не делается, и они вместе называются калибровкой.

При надлежащем процессе калибровки прямая линия, представляющая корректную, линейную корреляцию между потоком газа за единицу времени и уровнем течи, определяется с помощью двух точек: точки нуля (нет показания, когда не определена эмиссия) и

значения, показывающего уровень течи (корректное показание для известной течи).

В вакуумных режимах работы (метод распыления, спрея, раздел 5.7.1) необходимо разделять два типа калибровки: с внутренней или внешней контрольной течью. При использовании контрольной течи, встроенной в течеискатель, прибор может калиброваться самостоятельно, но он сможет калиброваться только сам себя. При использовании внешних контрольных течей может включаться не только прибор, но и вся конфигурация, например компоненты парциальных потоков. Внутренние течи постоянно находятся в приборе, и их нельзя заменить. В настоящее время все течеискатели, выпускаемые INFICON имеют функцию автоматической калибровки.

Щупы или приборы с подобной конфигурацией как правило будут калиброваться специальными, внешними течами, в которых есть гарантия, что, с одной стороны, все выпускающиеся пробные газы из контрольной течи достигают конца щупа (пробы), а с другой стороны, поток газа в щупе не будет помехой при калибровке. При выполнении измерений с использованием метода щупа (раздел 5.7.2) так же необходимо учесть расстояние между кончиком щупа и поверхностью образца и скоростью сканирования; это необходимо учитывать как часть калибровки. В особых случаях, когда измеряется концентрация гелия, калибровку можно выполнить с использованием концентрации гелия в воздухе, которая обычно составляет 5 ppm.

**Контрольные** (калибровочные, стандартные, опорные) **течи** обычно состоят из источника газа, дросселя (капилляра) определенной проводимости и клапана. Конфигурация будет соответствовать требуемому уровню течи. На рис. 5.9 представлены различные течи. Проникающие течи обычно используются в диапазоне уровней течей  $10^{-10} < Q_L < 10^{-7}$ , капилляры -  $10^{-8} < Q_L < 10^{-4}$ , а для очень больших течей в диапазоне 10...1000 мбар·л/с используются отрезки трубопроводов или дроссели (натекатели) с точно определенными значениями проводимости (размерами).

Контрольные течи, используемые с хладагентами, представляют особый случай, т.к. хладагенты являются жидкостями при комнатной температуре. Такие течи имеют пространство подачи для жидкостей, затвор, за которым находится пространство, заполненное только парами хладагента (при насыщенном давлении паров) и за ним – капиллярная течь. Одной технологической про-

блемой, которую сложно решить, является тот факт, что все хладагенты являются очень хорошими растворителями масел и смазочных материалов, поэтому трудно заполнить течь чистым хладагентом. решающим здесь является не только то, что имеет место химическое загрязнение, но и то, что все растворенные частички могут засорить капилляр.



- a. опорная течь без подачи газа TL4, TL6
- b. опорная течь для щупа и применения с вакуумом TL4-6
- c. внутренняя капиллярная контрольная течь TL7
- d. проникающая диффузионная опорная течь TL8
- e. калибровочная течь хладагента

Рисунок 5.9. Примеры конструкций контрольных течей

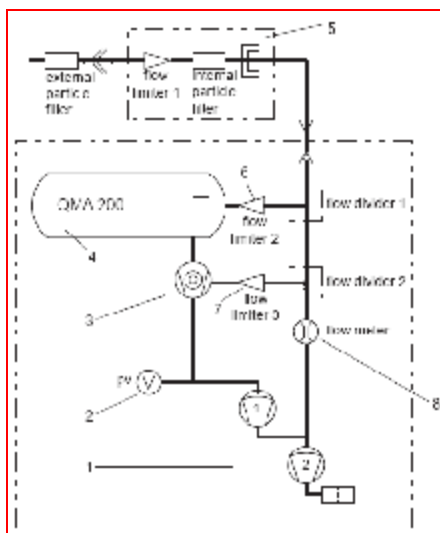
#### 5.5.2.4 Течеискатели с квадрупольным масс-спектрометром ECOTEC II

INFICON выпускает течеискатель с квадрупольным масс-спектрометром для регистрации масс, превышающих массу гелия. За исключением особых случаев ими могут быть хладагенты. Эти прибору используются для проверки герметичности холодильного оборудования, особенно для холодильников и кондиционеров воздуха.

На рис. 4.2 показана функциональная диаграмма квадрупольного масс-спектрометра. Из 4-х стержней системы разделения два имеют одинаковый потенциал и влияют на ионы, проходящие вдоль осевой линии, так что они совершают перпендикулярные колебания. Только когда амплитуда этих колебаний становится меньше, чем расстояние между стержнями, ионы могут пройти через систему стержней и достигнуть ионной ловушки, где они будут разряжены и пересчитаны. Поток электронов, созданных таким образом, образует соответствующий сигнал измерения. Другие ионы войдут в контакт со стержнями, где будут нейтрализованы.

На рис. 5.10 показана схема вакуумной системы течеискателя ECOTECII. Масс-спектрометр 4 работает только в условиях высокого вакуума, т.е. здесь давление должно всегда оставаться ниже  $10^{-4}$  мбар. Этот вакуум создается турбомолекулярным насосом 3 при поддержке диафрагменного насоса 1. Давление между двумя насосами PV изме-

руется пьезорезистивной системой измерения 2, и это давление лежит в диапазоне 1...4 мбар во время измерения. Это давление не должно превышать 10 мбар, иначе турбомолекулярный насос не сможет поддерживать вакуум в масс-спектрометре. Прибор можно легко переключить с гелия на любой хладагент, которые выбираются при необходимости. Естественно, прибор необходимо калибровать отдельно для каждой массы. Однако, однажды установленные значения остаются в памяти, так что после проведения калибровки для всех газов (для каждого газа нужна отдельная контрольная течь!) можно переключать прибор с одного газа на другой.



1. диафрагменный насос
2. пьезо-резист. сенсор давления
3. турбомолекулярный насос
4. квадрупольный масс-спектрометр
5. трубопровод щупа
- 6, 7, 9 ограничитель потока
8. потокомер/ расходомер
10. внутренний фильтр
11. внешний фильтр частиц
- 12, 13 делитель потока

Рисунок 5.10. Вакуумная схема течеискателя ECOTEC II

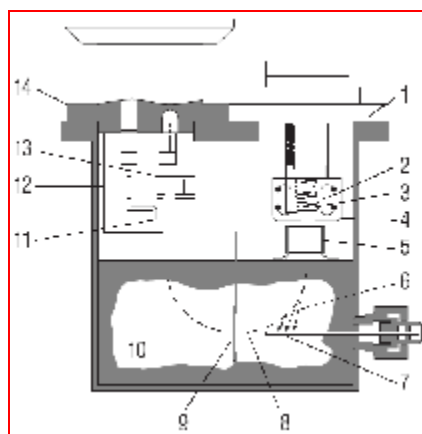
### 5.5.2.5 Гелиевые течеискатели с масс-спектрометром на 180° (UL200, UL500)

Эти приборы самые чувствительные и обеспечивают наибольшую степень точности. Они реализуют измерения с высокой надежностью, стабильностью, лучшим определением места течи и ее количественной оценки. По этой причине использование гелиевых течеискателей экономически оправдано. Несмотря на высокую стоимость, эти приборы могут использоваться в течение длительного времени, а для подготовки к работе и поиска течи им необходимо совсем мало времени. Гелиевые течеискатели в основном состоят из двух подсистем для портативных приборов и трех для стационарных:

1. масс-спектрометра,
2. высоковакуумного насоса,
3. дополнительной системы форвакуумной откачки в стационарных системах.

Масс-спектрометр (рис. 5.11) состоит из источника ионов (1-4) и системы отклонения (5-9). Ионный луч проходит через пластину с отверстием (5) и попадает в магнитное поле (8) при определенном уровне энергии. Внутри магнитного поля ионы двигаются по окружностям, причем радиус ионов с меньшей массой меньше. При корректной установке ускоряющего напряжения во время **настройки** можно получить ситуацию, в которой ионы опишут дугу с определенным радиусом кривизны. Когда присутствует масса 4 (гелий), то ионы проходят через отверстие 9 ионной ловушки 13. В некоторых устройствах ток разряда для ионов, ударяющихся об электрод общего давления, будет измеряться и считаться сигналом общего давления. Ионы, масса которых больше или меньше, не смогут достичь ионной ловушки 13. Но в некоторых случаях эти ионы, несмотря на все, будут достигать ее, из-за отклонений при соударении с нейтральными частицами газа, или из-за отклонения начальной энергии от требуемого уровня энергии. Затем эти ионы сортируются супрессором 11 так, что только ионы с массой 4 (гелий) могут достичь детектора 13. Энергия электронов в источнике ионов составляет 80 эВ. Она поддерживается на таком низком уровне так, что компоненты с указанной массой 4 и выше, такие как многозарядный углерод или четырехзарядный кислород, не могут создаваться. Источники ионов масс-спектрометров простые, надежные и легко заменяемые. При непрерывном нагреве во время работы они очень чувствительны к загрязнению. Два заменяющих друг друга иридиевых катода с покрытием из оксида иттрия увеличивают ресурс катода. Эти катоды менее чувствительны к попаданию воздуха, т.к. быстро срабатывающая защита отключения будет предохранять их от перегорания при подаче воздуха. Однако, длительное использование источника ионов может со временем привести к хрупкости катода, что может стать причиной его разрушения при вибрации или ударе.

В зависимости от способа подключения входа масс-спектрометра можно различить два типа MSLD.



- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| 1. фланец источника ионов         | 8. путь ионов для $M=4$                |
| 2. катод (2 катода $Ir+Y_2O_3$ )  | 9. промежуточный дроссель              |
| 3. анод                           | 10. магнитное поле                     |
| 4. экран источника ионов с соплом | 11. подавитель (супрессор)             |
| 5. экстрактор                     | 12. экран ионной ловушки               |
| 6. путь ионов для $M>4$           | 13. ионная ловушка                     |
| 7. электрод общего давления       | 14. фланец ионной ловушки с усилителем |

Рисунок 5.11 Конфигурация течеискателя с масс-спектрометром на  $180^\circ$

### 5.5.2.6 Течеискатели с прямым и обратным потоками

На рис. 5.12 показана схема вакуумной системы для двух типов течеискателей. В обоих случаях масс-спектрометр откачивается вакуумной системой, состоящей из турбомолекулярного и пластинчато-роторного насосов. На рис. слева показан **течеискатель с прямым потоком**. Газ из входного порта подается к спектрометру через охлаждаемую ловушку. Это эквивалентно крионасосу, в котором конденсируются все пары и загрязнения (ранее ловушка обеспечивала защиту от паров масла диффузионного насоса). Дополнительная система форвакуумной откачки обеспечивает предварительную откачку тестируемых компонентов или трубопроводов соединений между течеискателем и проверяемой системой. Т.к. достигается относительно низкое предельное давление (время откачки), клапан между дополнительной системой откачки и ловушкой будет открыт при измерении.  $S_{eff}$ , используемая в уравнении 5.4.b, является быстротой действия турбомолекулярного насоса (тмн) в месте расположения источника ионов.

$$Q_{He} = p_{He} \cdot S_{eff, \text{тмн.источник ионов}} \quad (5.5.a)$$

Для течеискателей с прямым потоком, увеличение чувствительности может достигаться за счет снижения быстроты откачки, напри-

мер, в результате установки дросселя между турбомолекулярным насосом и охлаждающей ловушкой. Она так же используется для достижения максимальной чувствительности. Рассмотрим пример:

Минимальное определяемое парциальное давление гелия равняется  $p_{\min He} = 1 \cdot 10^{-12}$  мбар. Быстрота действия для гелия должна быть  $S_{He} = 10$  л/с. Тогда минимальная определяемый уровень течи будет  $Q_{\min} = 1 \cdot 10^{-12}$  мбар  $\cdot$  10 л/с =  $= 1 \cdot 10^{-11}$  мбар  $\cdot$  л/с. Если быстрота действия снизится до 1 л/с, то минимальная определяемая течь будет  $1 \cdot 10^{-12}$  мбар/л/с. Необходимо помнить, что с повышением чувствительности постоянная времени для достижения стабильного давления пробного газа в тестовом образце будет соответственно больше (раздел 5.5.2.9).

Для обоих типов течеискателей, в стационарные приборы встраивается дополнительная система откачки для обеспечения откачки тестового соединения. В портативных приборах, необходимо предусмотреть отдельный внешний насос, исходя из массы оборудования.

На рис. 5.12 справа представлена схема **течеискателя с обратным потоком**. Масс-спектрометр, высоковакуумная система, система дополнительной форвакуумной откачки в точности соответствуют конфигурации прибора с прямым потоком. Подача исследуемого газа подсоединена между форвакуумным и турбомолекулярным насосами. Гелий, который достигает этой точки разделения после открытия клапана будет приводить к повышению давления гелия в турбомолекулярном насосе и масс-спектрометре. Быстрота действия  $S_{eff}$  в уравнении 5.4.b будет равняться скорости действия форвакуумного насоса в точке разделения. Парциальное давление гелия, установившееся там, снижается на коэффициент компрессии турбомолекулярного насоса, измеренного в масс-спектрометре. Скорость турбомолекулярного насоса в течеискателе обратного потока регулируется таким образом, что коэффициент компрессии так же остается постоянным. Из уравнения 5.5.a следует 5.5.b:

$$Q_{He} = p_{He} \cdot S_{eff} \cdot K \quad (5.5.b)$$

$S_{eff}$  = эффективная быстрота действия форвакуумного насоса в точке разделения,  $K$  = коэффициент компрессии турбомолекулярного насоса по гелию.



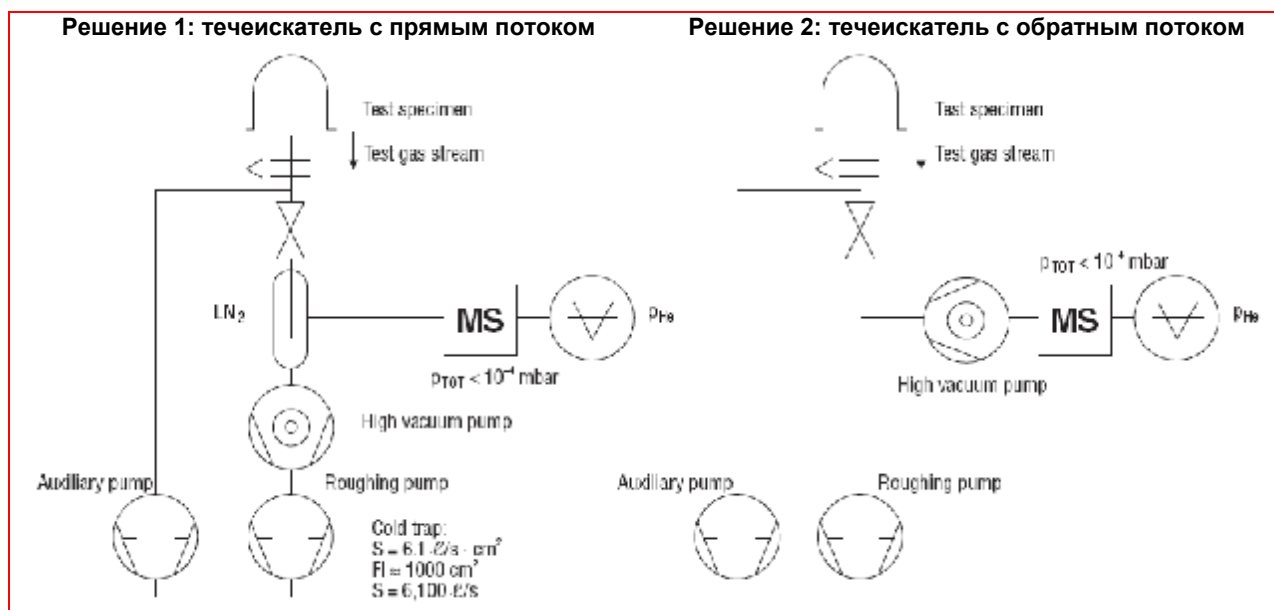


Рисунок 5.12. Течеискатели с прямым и обратным потоком

Течеискатели с обратным потоком особенно предпочтительны в автоматических вакуумных системах, т.к. здесь есть четко измеренное давление, при котором открывается клапан, особенно форвакуумное давление при турбомолекулярном насосе. Т.к. турбомолекулярный насос имеет очень большую способность компрессии для больших масс, тяжелые молекулы по сравнению с легким пробным газом, гелием,  $M = 4$ , могут на деле не достигать масс-спектрометра. Т.е. турбомолекулярный насос обеспечивает идеальную защиту для масс-спектрометра и больше нет необходимости использовать охлаждаемую ловушку  $LN_2$ , что является большим преимуществом для пользователя. Исторически, течеискатель с обратным потоком был изобретен позднее. Это явилось следствием недостаточной скорости действия, которая в течение длительного времени имела место при использовании в пластинчато-роторных насосах.

### 5.5.2.7 Работа с парциальными потоками

Когда размер вакуумной камеры или течи делает невозможным откачку тестируемого образца до необходимого входного давления, или когда этот процесс может занять слишком много времени, тогда придется использовать дополнительные насосы. В этом случае течеискатель работает в соответствии с так называемым методом парциальных потоков. Это означает, что обычно большая часть газа, откачиваемого из тестируемого образца, будет удаляться с помощью дополнительной системы откачки, так что в гелие-

вый течеискатель будет попадать только часть потока (см. рис. 5.13). Разделение потока газа происходит в соответствии с быстротой действия, преобладающей в точке разделения. Применимо следующее выражение:

$$Q_{\text{вакуумн. камера}} = \gamma \cdot \text{Display}_{\text{теческ}} \quad (5.6)$$

где  $\gamma$  – характеристика отношения парциальных потоков, то есть часть всего потока течи, которая отображается в течеискателе. Когда отношение парциального потока неизвестно,  $\gamma$  можно определить с помощью опорной течи, присоединенной к вакуумной камере (отношение отображения в течеискателе к уровню опорной течи):

$$\gamma = \frac{\text{Display at the leakd} - r}{Q_L \text{ for the reference leak}} \quad (5.7)$$

### 5.5.2.8 Подключение к вакуумной системе

Концепция парциальных потоков обычно используется при подсоединении течеискателя к вакуумной системе с многоступенчатой системой откачки. При рассмотрении места лучшего соединения необходимо учитывать, что маленькие портативные приборы имеют очень низкую скорость откачки для фланцевого соединения (менее 1 л/с). Это делает все более важным оценить – на основе отношения парциального потока, ожидаемого при откачке диффузионным насосом с высокой скоростью действия к примеру 12000 л/с – какой уровень течи можно определить. В системе с высоким вакуумом и насосами Рутса лучшей

опцией будет подключение течеискателя между пластинчато-роторным и высоковакуумным насосами. Если давление здесь выше допустимого входного давления течеискателя, его следует подключать с помощью течеискателя (клапана с изменяемой проводимостью). Обычно приходится находить подходящий фланец. Так же желательно установить клапан в этой точке так, чтобы при необходимости можно было бы быстро подсоединить (при работающей системе) и течеискатель мог начать работу сразу после открытия клапана. Чтобы избежать нежелательного открытия клапана, следует поставить заглушку на время обычной работы вакуумной системы.

Вторым методом подсоединения к большим системам, которые, например, откачивают воздух из турбин на электрических станциях, является подключение на выходе. Щуп вставляется в выходной порт системы. Без надежной герметизации выхлопного порта, предельным значением для определения в этом случае будет 5 ppm – естественная концентрация гелия в воздухе. В промышленных условиях достаточно установить конец щупа под углом 45° к верху выхлопного трубопровода (обычно направленной вверх) насоса (водокольцевого).

### 5.5.2.9 Постоянные времени

Постоянные времени для вакуумной системы устанавливаются как

$$\tau = \frac{V}{S_{eff}} \quad (5.8)$$

$\tau$  - постоянная времени,

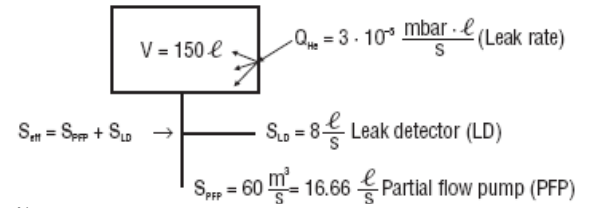
$V$  - объем камеры,

$S_{eff}$  - эффективная быстрота действия в тестируемом объекте.

На рис. 5.14 показаны сигналы после распыления течи в тестируемом образце, присоединенном к течеискателю для трех различных конфигураций:

1. центр: образец с объемом  $V$  присоединен прямо к течеискателю  $LD$  (быстрота  $S$ ).
2. слева: в дополнение к п.1 образцу присоединен насос для парциального потока с эффективной быстротой действия  $S^I = S$ .
3. справа: как и 1, но  $S = 0.5 \cdot S$ .

### Принцип парциального потока (пример)



А) амплитуда сигнала:  
Разделение потока газа (так же и пробного газа) в соответствии с эффективной быстротой действия в точке разделения парциального потока:

Общая быстрота действия:

$$S_{eff} = S_{LD} + S_{PFP} = 8 + 16.66 = 24.66 \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

Сигнал течеискателя:

$$3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мбар} \cdot \text{л}}{\text{с}} \cdot \frac{16.66 \frac{\text{л}}{\text{с}}}{(8 + 16.66) \frac{\text{л}}{\text{с}}} = 2.02 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мбар} \cdot \text{л}}{\text{с}}$$

Сигнал парц. потока насоса:

$$3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мбар} \cdot \text{л}}{\text{с}} \cdot \frac{16.66 \frac{\text{л}}{\text{с}}}{(8 + 16.66) \frac{\text{л}}{\text{с}}} = 2.02 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мбар} \cdot \text{л}}{\text{с}}$$

Проверка – общий сигнал:

$$Q_{He} = Q_{LD} + Q_{PFP} = 3.00 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мбар} \cdot \text{л}}{\text{с}}$$

Отношение парциального потока = часть общего потока к течеискателю

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \frac{Q_{LD}}{Q_{He}} = \frac{1}{1 + \frac{Q_{PFP}}{Q_{LD}}} \\ \text{или} \\ \gamma &= \frac{S_{LD}}{S_{LD} + S_{PFP}} = \frac{1}{1 + \frac{S_{PFP}}{S_{LD}}} \end{aligned} \right\} Q_{LD} = \gamma \cdot Q_{He}$$

В) время ответа:

$$t_{95\%} = 3 \cdot \frac{V}{S_{eff}} = 3 \cdot \frac{150 \text{ л}}{24.66 \frac{\text{л}}{\text{с}}} = 18.25 \text{ с}$$

Условия: при неизвестных  $S$ ,  $V$  и  $\gamma$  – калибровка по опорной течи

Рисунок 5.13. Принцип парциальных потоков

Сигнал можно интерпретировать следующим образом:

1. следующий мертвый период (или время задержки) до видимого уровня сигнала, сигнал, который пропорционален парциальному давлению гелия будет возрастать от нуля до значения  $p_{He} = Q/S_{eff}$  в соответствии с уравнением:

$$p_{He} = \frac{Q}{S_{eff}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (5.9)$$

Сигнал будет достигать пропорции от своего предельного значения после:

$$t = 1\tau \dots 63.3\% \quad t = 2\tau \dots 86.5\%$$

$$t = 3\tau \dots 95.0\% \quad t = 4\tau \dots 98.2\%$$

$$t = 5\tau \dots 99.3\% \quad t = 6\tau \dots 99.8\%$$

Период, требуемый для достижения 95% от предельного значения, обычно называется **временем ответа**.

2. При установке насоса парциального давления постоянная времени и амплитуда сигнала будут снижены в 2 раза. Это означает более быстрый подъем, но сигнал увеличится только наполовину. Меньшая постоянная времени означает быстрое изменение и быстрое отображение показания, т.е. меньшее время поиска течи.

3. Дросселирование быстроты действия ( $0.5S$ ) увеличит и постоянную времени и амплитуду сигнала в 2 раза. Большее значение постоянной времени увеличит требуемое время. Большая чувствительность, достигаемая за счет снижения быстроты действия, всегда связана с увеличением требуемого времени, что не всегда является преимуществом.

Оценку общей постоянной времени для нескольких объемов, подключенных один за другим, и соответствующих насосов можно выполнить в начальном приближении сложением отдельных постоянных времени.

## 5.6 Предельные значения (характеристики течеискателя)

1. Минимальный определяемый уровень течи.
2. Эффективная быстрота действия в тестовом соединении.
3. Максимальное допустимое давление внутри образца (так же максимальное допустимое входное давление). Это давление  $p_{\max}$  будет около  $10^{-1}$  для течеискателей с классическим *PFP* и около 2...10 мбар для приборов с совмещенным *PFP*. Производство максимального допустимого рабочего давления на быстроту действия  $S$  системы откачки в тестовом соединении течеискателя дает максимальную допустимую производительность:

$$Q_{\max} = p_{\max} \cdot S_{\text{eff, connector}} \quad (5.10)$$

Это уравнение показывает, что нет причин для получения наибольшей чувствительности через уменьшение быстроты действия. В этом случае максимальная производительность тоже будет уменьшаться. Прибор не функционален, когда объем газа, попадающего в прибор, превышает его производительность.

## 5.7 Определение течей с использованием гелиевого течеискателя

### 5.7.1 Метод обдува (сопла, локальный поиск течей)

Тестируемый образец, подключенный к гелиевому течеискателю, обдувается медленно передвигаемым источником гелия (соплом), помогающим найти течи (в местах сварных, фланцевых и паяных соединений) с учетом постоянной времени системы из уравнения 5.8 (рис. 5.14). Обдув должен быть подобран так, чтобы соответствовать определяемому уровню течи, размеру и возможности исследуемого объема. Хотя гелий легче воздуха, и поэтому будет собираться под потолком, из-за сквозняков, движением воздуха он будет разноситься по комнате, поэтому не следует считать, что гелий при поиске течей будет находиться только под потолком. Несмотря на это поиск течи желательно начинать с верха объема, особенно, если они большие.

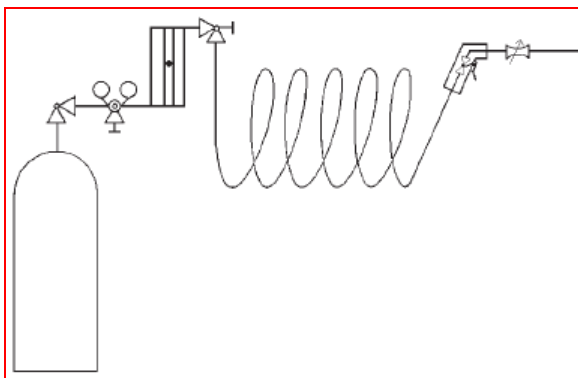
Чтобы избежать подъем гелия при открытии клапана обдува (т.к. это будет «загрязнять» окружающую среду) желательно установить воздушную заслонку, чтобы настроить количество гелия сразу после или перед соплом подачи гелия обдува (рис. 5.15). Корректное количество можно определить самым простым измерением выходного отверстия через баллон с водой, в котором будут подниматься пузырьки. Потокомер с изменяемым сечением действительно необходим для подачи маленького количества газа, но он слишком дорогой. Чтобы определить, течет ли еще гелий, можно опять воспользоваться емкостью с водой.

Содержание гелия в воздухе можно так же определить с помощью гелиевого течеискателя, когда большая течь позволяет попасть в объем воздуха в достаточном количестве, что доля гелия 5 ppm в воздухе становится достаточной для определения. Тогда уровень течи будет:

$$\frac{\text{Display (pure He)}}{1} = \frac{\text{Display (atmosph. He)}}{5 \cdot 10^{-6}} \quad (5.11)$$



$Q_L$  = показание чистого He ( $display(pureHe)$ ) =  $2.10^{+5}$  = показание атмосферного He ( $display\ atmosph.He$ ).



Чтобы избежать сильного потока гелия при открытии клапана сопла

а) дроссель или

б) натекатель устанавливаются перед соплом подачи.

Минимальное количество гелия для корректного показания: изменение установок дросселя не меняет показания. Минимальное количество всегда меньше, чем установленное без потокомера. Простейший способ проверки и установки потока гелия – пузырьки через воду.

*Рисунок 5.15. Оборудование подачи гелия.*

## 5.7.2 Метод щупа - локальный поиск течей с использованием избыточного давления

Здесь точки возможных мест нахождения течей в испытываемом образце, находящемся под давлением (рис. 5.4.d) тщательно исследуются щупом, соединенным с течеискателем через штуцер (сопла). С помощью течеискателей INFICON можно определить гелий или водород. Чувствительность этого метода и точность нахождения месторасположения течи будут зависеть от конструкции щупа и времени ответа присоединенного течеискателя. Кроме того, это так же будет зависеть от скорости перемещения щупа и расстояния между кончиком щупа и поверхностью образца. Большое число параметров, играющих важную роль при использовании этого метода, делают сложным количественное определение уровня течи этим методом. Использование щупа, виртуально независимого от рода газа, возможно при определении течей до 10-7 мбар.л/с. Ограничение чувствительности при определении гелия является следствием наличия гелия в атмосфере (раздел 9, табл. 8). Относительно количественных измерений: щуп и течеискатель могут калиброваться вместе. Тогда, расстояние между щупом и образцом и скорость перемещения щупа тоже должны учитываться при калибровке.

## 5.7.3 Поиск в вакууме (полный поиск течей)

Вакуумные испытания являются общим случаем поиска течей, использующим гелий в качестве пробного газа, в котором испытываемый образец находится под жесткой металлической или мягкой пластиковой оболочкой (конвертом). Гелий, который подается или покидает (в зависимости от рода испытания) образец поступает в течеискатель, где происходит измерение течи. При этих испытаниях образец может или находится под давлением (рис. 5.4.c) или быть откачанным (рис. 5.4.a). В обоих случаях может быть необходимо преобразовать накопление гелия в стандартную гелиевую течь.

### 5.7.3.1 Испытание образца, заполненного гелием

#### а) концентрация измерений и последующий расчет течи

чтобы определить общий уровень течи испытываемого образца, заполненного гелием и находящегося под давлением, образец следует поместить в «конверт» - оболочку. Вытекающий газ будет накапливаться под оболочкой, т.е. концентрация гелия будет возрастать. По истечении рабочего времени изменение концентрации гелия под оболочкой можно измерить с помощью щупа, подсоединенного к гелиевому течеискателю. Интегральный уровень течи можно вычислить в результате калибровки по воздуху в качестве опорного газа. С помощью этого метода можно определить минимальные течи. Этот метод подходит для автоматизированных промышленных испытаний и контроля герметичности. В результате накопления газа пределы для обычного метода щупа увеличиваются в сторону уменьшения течей и условий окружающей среды, таких как температура, поток воздуха, а скорость щупа становится менее значимой. При использовании пластиковых оболочек необходимо учитывать проникновение гелия через них во время длительного рабочего периода.

#### б) прямое измерение течи с использованием течеискателем

когда образец, заполненный гелием, помещается в вакуумную камеру, соединенную с течеискателем, тогда можно напрямую измерить течь.

### 5.7.3.2 Проверка герметичности откачанных образцов

#### а) пластиковый тент

откачанный образец окружается легкой пластиковой оболочкой, которая заполняется гелием после удаления атмосферного воздуха.

ха. Когда в качестве оболочки используются пластиковые пакеты, необходимо полностью удалить из них воздух, чтобы обеспечить испытания с максимально возможным чистым гелием. Внешняя поверхность образца будет находиться в контакте с пробным газом. Если пробный газ будет попадать внутрь образца, то будет измерен общий уровень течи независимо от количества течей. В качестве дополнения: необходимо следить при повторных испытаниях, чтобы гелий быстро удалялся из помещения, где проводятся испытания. Использование пакетов более желательно для одноразовых испытаний на больших производствах. Пакет часто называют тендом.

#### **б) жесткий конверт**

использование твердой вакуумной камеры в качестве оболочки более желательно при выполнении измерений общего уровня течи. При использовании жесткой оболочки возможно обратно откачать гелий по завершении испытаний (экономия газа).

### **5.7.4 Хранение под давлением**

#### **Метод бомбардировки**

Этот метод используется для проверки герметичности компонентов, которые уже герметичны, или в которых существуют герметичные полости. Проверяемые компоненты (транзисторы, IC корпуса, нертутное язычковое реле, язычковый геркон, кварцевый генератор, лазерные диоды и т.п.) помещаются в камеру, заполненную гелием. Работа идет при давлении пробного газа в диапазоне 5...10 бар. Компоненты находятся под столь высоким давлением в течении нескольких часов, в результате чего пробный газ оказывается внутри компонентов. Этот метод называется бомбежкой. Чтобы определить уровень течи образцы помещают в вакуум и проводят действия как в методе с оболочками. Определяется общий уровень течи. Однако образцы с большими течами теряют свой гелий при откачке камеры, поэтому течи в них не определяются при использовании течеискателя. Тогда следует использовать другие методы для предварительного поиска течей в вакуумной камере.

## **5.8 Промышленный контроль герметичности**

Промышленный контроль герметичности с гелием в качестве пробного газа с использованием оборудования для поиска течей полностью интегрирован в производственные линии. Конструкция таких тестовых комплексов будет зависеть от задач, выполняемых в каждом конкретном случае (т.е. камеры для поиска течей алюминиевых ободов или металлических барабанов). По возможности будут использоваться стандартные модули. Образцы будут попадать в систему поиска течей или вакуумную камеру с помощью конвейеров. Образцы будут проверяться отдельно с использованием обобщенных методов и автоматически двигаться дальше. Бракованные образцы будут удаляться.

Преимущества методов поиска течей с использованием гелия с точки зрения промышленности следующие:

- Уровень течи, который можно определить, удовлетворяет всем практическим требованиям.
- Общий поиск течей для всех отдельных течей, возможность определения микроскопических течей, приводящих к общим утечкам, аналогичным большой отдельной течи.
- Автоматизация процедур поиска.
- Циклическая автоматическая система проверки герметичности (самодиагностика) гарантирует высокую надежность системы.
- Гелий не является токсичным или опасным газом (нет предельно допустимой концентрации).
- Результаты испытаний можно легко задокументировать, определить параметры, распечатать результаты.

Использование методов поиска течей с помощью гелия значительно повышает эффективность (время цикла – несколько секунд) и дает высокую надежность испытаний. Требования по стандарту EN/ISO9000 с использованием традиционных методов промышленного контроля герметичности будут удовлетворены.



## 6 Контроллеры тонких пленок и блоки управления с кварцевыми осцилляторами

### 6.1 Введение

Переход от покрытия кристаллов тонкими пленками для точной настройки частоты резонансных колебаний, к использованию изменения частоты для определения массы единицы площади с современной степенью точности занял много времени. В 1880 г. два брата, П. и Ж. Кюри, открыли пьезоэлектрический эффект. Под действием механической нагрузки на некоторые поверхности кварцевого кристалла образуются электрические разряды, которые вызываются кристаллами  $\text{SiO}_2$  асимметричной структуры. Соответственно, деформация в пьезокристалле появляется в результате действия электрического поля, а механические колебания происходят в других полях. Делается различие между изгибающими колебаниями, толщиной сдвиговых волн и колебаниями по толщине среза. В зависимости от ориентации разрезанной плоскости кристаллической решетки различается количество различных срезов, из которых только так называемый АТ срез с углом среза  $35^\circ 10'$  используется в контроллерах толщины, т.к. частота имеет очень низкую зависимость от температуры в диапазоне  $0...50^\circ\text{C}$  для этого среза. Соответственно, не должно быть попыток превысить этот диапазон температур во время нанесения покрытия (с водяным охлаждением держателя кристалла).

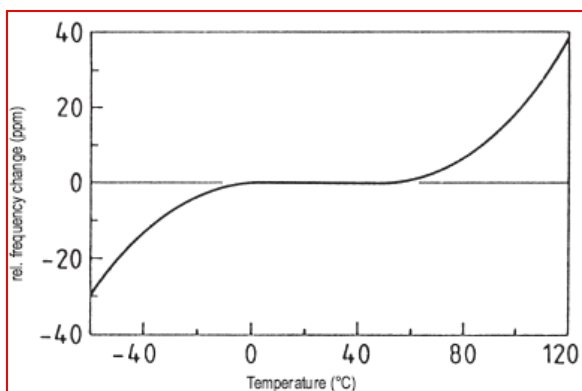


Рисунок 6.1. Собственная частота как функция температуры в АТ срезе кварцевого кристалла

Т.к. еще есть проблема кварцевой емкости (т.е. максимальной возможной толщины кварца, на котором возможно надежное колебание) несмотря на достижения техноло-

гии для увеличения этой емкости разработан ряд приближений:

1. использование нескольких кристаллов, один за другим, в составном держателе кристаллов с автоматическим изменением и обновлением данных в случае возможной неисправности кристалла: **CrystalSix**.
2. функция **RateWatcher** в которой кварц попеременно подходит к лучу напыления на короткое время, пока не будут сделаны все измерения и регулировки и затем остается закрытым заслонкой на более длительный период.

Выбор правильного держателя кристаллов играет большую роль во всех изменениях с кварцевыми осцилляторами. В зависимости от назначения рекомендуется использовать различные типы конструкций держателей кристаллов: с заслонкой и без, прогреваемые для сверхвысоковакуумных технологических процессов, двойной держатель или 6 кристаллов в качестве особой модели для процессов напыления (осаждения). В дополнение к этим столь важным механическим аспектам, дальше будут обсуждаться достоинства при изменении и управлении и другие характеристики оборудования.

### 6.2 Основные принципы измерения толщины пленок с кварцевым осциллятором

Измеритель толщины покрытия с кварцевым осциллятором (контроллер тонких пленок) использует пьезоэлектрическую чувствительность кварцевого осциллятора (кристалла измерителя) к приложенной массе. Это свойство используется для измерения уровня покрытия и окончательной толщины при вакуумном нанесении покрытий.

Происходит очень сильный электромеханический резонанс при некоторых дискретных частотах прикладываемого напряжения. Если масса добавляется на поверхность кварцевого кристалла колеблющегося в резонансе, частота резонанса уменьшается. Это изменение частоты является очень значимым и точно определяется для различных режимов колебания кварца. Сегодня этот феномен, который легко понять как гистерезис, является необходимым средством измерения и управления процессом, с помощью которого можно определить увеличение покрытия менее чем на один атомный слой.

В конце 1950<sup>x</sup> Sauerbrey и Lostis открыли, что изменение частоты, связанное с покрытием

кварцевого кристалла является функцией изменения массы в результате нанесения материала покрытия следующим образом:

$$\frac{M_f}{M_q} = \frac{\Delta F}{F_q} \quad \text{или} \quad M_f = M_q \cdot \frac{\Delta F}{F_q} \quad (6.1)$$

где

$M_f$  – масса покрытия,

$M_q$  – масса кварца без покрытия,

$F_q$  – частота перед нанесением покрытия,

$F_c$  – частота после нанесения покрытия,

$\Delta F = F_f - F_c$  – изменение частоты в ходе нанесения покрытия.

Теперь применим

$$M_f = (M_c - M_q) = D_f \cdot \rho_f \cdot A$$

$$\text{и } M_q = D_q \cdot \rho_q \cdot A$$

где  $D$  – толщина покрытия,  $\rho$  – плотность,  $A$  – площадь области с индексом  $q$  для состояния непокрытого кварца, а  $c$  – для состояния после нанесения покрытия. Тогда для толщины покрытия можно получить следующие результаты:

$$D_f = \frac{F_q}{F_q} \cdot D_q \cdot \rho_q \cdot \frac{\Delta F}{F_q \cdot \rho_f} = K \cdot \frac{\Delta F}{\rho_f}$$

$$K = \frac{D_q \cdot F_q \cdot \rho_q}{F_q^2} = \frac{N_{AT} \cdot \rho_q}{F_q^2}$$

где  $N = F_q \cdot D_q$  – постоянная частоты (для  $AT$  среза  $N_{AT} = 166100 \text{ Гц} \cdot \text{см}$ ),  $\rho_q = 2.649 \text{ г/см}^3$  плотность кварца. Толщина покрытия пропорциональна изменению частоты  $\Delta F$  и обратно пропорциональна плотности наносимого материала  $\rho_f$ . Уравнение для толщины покрытия

$$D_f = K \cdot \frac{\Delta F}{\rho_f}$$

использовано при первом измерении толщины покрытия прибором и измерением частоты. Согласно этому уравнению кристалл с начальной частотой 6.0 МГц покажет изменение частоты на 2,27 Гц после нанесения покрытия 1Å алюминия ( $\rho = 2.77 \text{ г/см}^3$ ). В этом случае рост фиксированного покрытия в результате испарения или осаждения (напыления) можно наблюдать через точное изме-

рение изменения частоты кристалла. Количественное определение наносимого материала на подложку в вакууме стало возможно только при наличии знаний о количественном соотношении этого эффекта. Ранее это было невозможно.

### 6.3 Форма кристаллов кварцевого осциллятора

Несмотря на сложность электронной среды, главным компонентом при измерении толщины покрытия остается кварцевый кристалл измерения. Изначально кристаллы измерения имели квадратную форму. На рис. 6.4. показан спектр частот резонанса кварцевого резонатора современной конструкции (рис. 6.3). Нижняя частота резонанса изначально дается как толщина размаха колебаний, которая называется основной волной. Характеристики движения размаха колебаний параллельны основной границе поверхности кристалла. Другими словами поверхности являются сдвигами пучности (см. рис. 6.2). Частоты резонанса чуть выше основной волны называются негармоническими и являются комбинацией размаха колебаний и поворота колебаний. Частоты резонанса, которые в три раза выше основной частоты, называются квазигармоническими. Рядом с квазигармоническими частотами есть ряд негармонических, с чуть более высокой частотой.

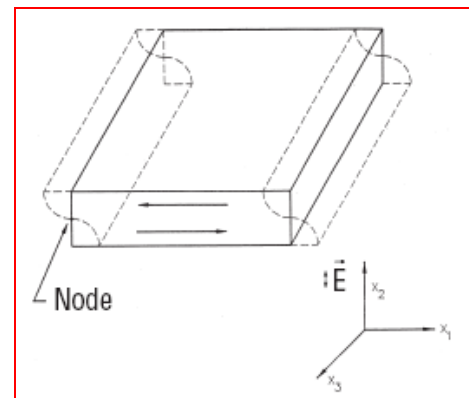


Рисунок 6.2. Размах колебаний.

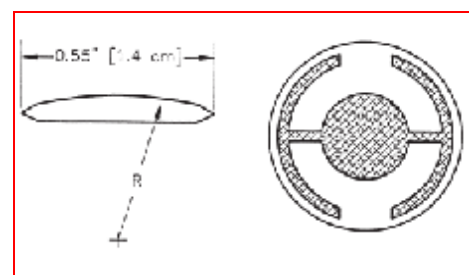


Рисунок 6.3. форма кварцевого кристалла INFICON

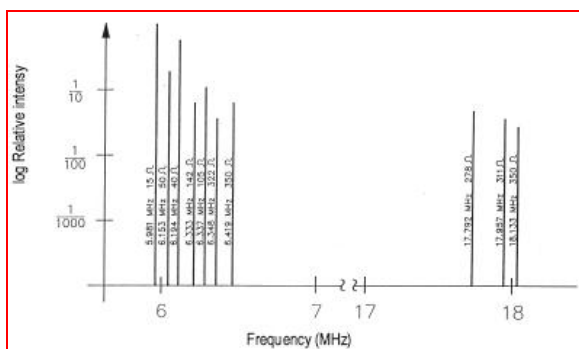


Рисунок 6.4. Спектр частот резонанса

Конструкция кристаллов измерения, используемых сегодня (рис. 6.3), отображает ряд значительных улучшений относительно первоначальных квадратных кристаллов.

Первым улучшением стало использование круглых кристаллов. Расширенная геометрия значительно снижает количество возможных режимов колебаний. Вторая группа улучшений включает обеспечение контура поверхности, делающего меньшим электрод возбуждения. Эти два момента гарантируют запись акустической энергии. Снижение диаметра электрода ограничивает возбуждение в средней области. Контур поверхности поглощает энергию движения акустических волн до того, как они достигнут кромки кристалла. Волны не отражаются к центру, где могли бы складываться с новыми приходящими волнами.

Такие маленькие кристаллы ведут себя так же, как и большие. Однако, если вибрации кристалла сосредоточена в центре, можно зажать внешний край держателя кристалла без нежелательных последствий. Более того, создание контуров снижает интенсивность резонанса нежелательных негармонических колебаний. Это значительно ограничивает емкость резонатора для поддержания этих колебаний.

Использование адгезивных покрытий увеличивает адгезию кварцевого кристалла. Снижается даже уровень пиков, появляющихся с увеличением напряжения пленки и вызывающих микротрещины в покрытии. Наносимые материалы остаются в этих микротрещинах без адгезии и поэтому не могут вызывать колебания. Эти открытые области не регистрируются, и будет дано некорректное показание толщины.

На рис. 6.4 показано поведение частот кварцевого кристалла, форма которого показана на рис. 6.3. Ордината соответствует амплитуде колебаний или току, идущему через кристалл как функция частоты по абсциссе.

Обычно для измерения толщины покрытия выбирается  $AT$  срез, т.к. при этом выборе

угла среза частота имеет самый маленький температурный коэффициент при комнатной температуре.

Т.к. порой нельзя усмотреть различий между \* в покрытии: снижение частоты = негативно влиянию,

\* в изменении температуры: отрицательное или положительное влияние,

\* в температурном градиенте кристалла: отрицательное или положительное влияние,

\* в напряжении, инициируемом покрытием, Очень важно, минимизировать влияние температуры. Это является единственным способом фиксации незначительного изменения массы.

## 6.4 Период измерения

Хотя приборы, которые работают согласно уравнению 6.2, бывают очень полезны, вскоре становится ясно, что при необходимой точности область их применения обычно ограничивается  $\Delta F < 0.02 F_q$ . Даже при относительном изменении частоты  $(F_q - F_c) / F_q < 2\%$  возникают ошибки около 2% при измерении толщины покрытия, так что ресурс использования кристалла в случае измерения покрытия 6 МГц будет около 120 кГц.

В 1961 г Behrndt открыл, что:

$$\frac{M_f}{M_q} = \frac{(T_c - T_q)}{T_q} = \frac{\Delta F}{F_c} \quad (6.3)$$

где

$$T_c = 1/F_c \text{ — период колебания с покрытием,}$$

$$T_q = 1/F_q \text{ — период колебания без покрытия.}$$

Период измерения (длительность измерения колебания) является результатом введения цифрового измерения времени и открытия пропорциональности между толщиной кристалла  $D_q$  и периодом колебаний  $T_q$ . Необходимость точности измерения толщины допускает применение уравнения 6.3 до  $\Delta F < 0.05 F_q$ .

В период измерения второй кристалл осциллятора используется как опорный осциллятор, который не покрыт и частота колебаний которого значительно выше частоты колебаний кристалла измерения. Опорный осциллятор создает небольшой прецизионный интервал времени, по которому определяется пе-



риод колебаний кристалла измерения. Это делается с помощью двух счетчиков импульсов: первый считает фиксированное количество колебаний измерения  $m$ . Второй счетчик включается одновременно с первым и считает колебания опорного кристалла во время  $m$  колебаний кристалла измерения. Т.к. опорная частота  $F_r$  известна и постоянна, время для  $m$  колебаний измерения можно определить с точностью до  $\pm 2/F_r$ . Тогда период колебаний измерения

$$\frac{n}{F_r \cdot m}$$

где  $n$  – показания опорного счетчика. Точность измерения определяется частотой опорных колебаний и длительностью времени подсчета, которая указывается через  $m$ .

Для низких уровней покрытий, маленьких плотностей наносимого материала и быстрых измерений (что требует короткого времени подсчета) важно, чтобы опорные колебания выполнялись с высокой частотой. Все это требует высокой точности времени, так что небольшие изменения частоты, связанные с нанесением покрытия, можно определить. Если изменение частоты кристалла измерения снижается между двумя измерениями на порядок точности измерения частоты, хорошая регулировка уровня становится невозможной (регулировка уровня: регулировка подачи энергии к источнику покрытия таким образом, чтобы обеспечить указанный рост покрытия во времени). Большое измерение вызывает больше помех в замкнутом контуре, который можно считать только при больших постоянных времени. Это в свою очередь медленно выполнит корректировку, благодаря системе отклонения, для относительно длительных отклонений от желаемого уровня. Это может быть не важным для простых покрытий, но для особых покрытий, как в случае нанесения оптических фильтров, или очень тонких, медленно растущих однокристаллических покрытий, могут приводить к ошибкам. В большинстве случаев, желаемые свойства таких покрытий будут потеряны, если уровень отклонения будет больше 1 или 2 процентов. Т.е. частота и стабильность опорного осциллятора определяет точность измерения.

## 6.5 Z Метод

Miller и Volef (1968) рассматривали кварцевый осциллятор как и систему напыления как одномерный когерентный акустический резонатор. Lu и Lewis (1972) разработали на

этой основе упрощенное уравнение Z согласования (Z метод). Одновременное развитие в области электроники, особенно в микропроцессорах, сделало возможным решение уравнение Z согласования в реальном времени. Большинство блоков управления процессами напыления, продаваемых сегодня, используют это сложное уравнение, которое учитывает акустические свойства кварцевого осциллятора /системы напыления:

$$T_f = \left( \frac{N_{AT} \cdot d_q}{\pi \cdot d_f \cdot F_c \cdot Z} \right) \cdot \arctg \left( Z \cdot \operatorname{tg} \left[ \frac{\pi \cdot (F_q - F_c)}{F_q} \right] \right) \quad (6.4)$$

$$Z = \frac{\sqrt{d_q \cdot U_q}}{d_f \cdot U_f} \quad \text{отношение акустического импеданса,}$$

$U_q$  – модуль сдвига кварца,

$U_f$  - модуль сдвига пленки.

Это лежит в основе понимания конверсии изменения колебания в толщину, которую можно корректировать на практике в рамках управления технологическим процессом. Чтобы достичь высокой степени точности пользователь должен ввести только дополнительный параметр  $Z_f$  материала покрытия. Достоверность уравнения была подтверждена для большинства материалов и его можно применять для изменения частоты до  $\Delta F < 0.4 F_q$ ! Обратите внимание, что уравнение 6.2 действует при  $\Delta F < 0.02 F_q$ , а уравнение 6.3 только до  $\Delta F < 0.05 F_q$ .

## 6.6 Активный осциллятор

Все приборы, разработанные на сегодняшний день, основаны на использовании активного осциллятора, схема которого показана на рис. 6.5. этот контур поддерживает кристалл активным в резонансе так, что может поддерживаться любой тип длительности колебаний или частота измерений. В контуре такого типа колебания поддерживаются столь долго, сколько подается энергии от усилителя для компенсации потерь в контуре колебаний кристалла, и кристалл может влиять на необходимый фазовый сдвиг. Основная стабильность кристалла осциллятора создается через внезапное фазовое изменение, которое происходит рядом с точкой последовательного резонанса с небольшим изменением частоты кристалла (рис. 6.6).



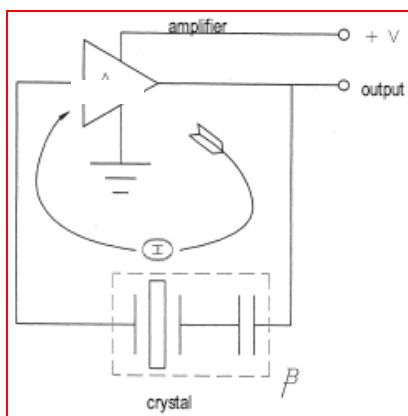


Рисунок 6.5. Контур активного осциллятора

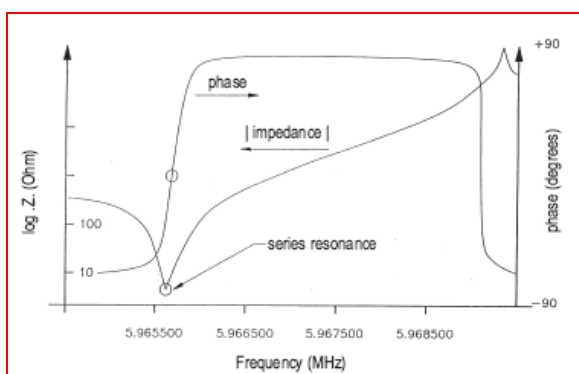


Рисунок 6.6. Частоты кристалла в точке последовательного резонанса

Обычно контур осциллятора проектируется таким образом, чтобы кристаллу требовался фазовый сдвиг  $0^\circ$  для допуска работы в точке последовательного резонанса. Длительная и кратковременная стабильность частоты является свойствами кристаллических осцилляторов из-за очень маленького изменения частоты, необходимого для поддержания фазового сдвига, необходимого для колебания. Стабильность частоты обеспечивается кварцевым кристаллом, даже если есть длительные смещения в электрических значениях, которые вызываются дрожанием фазы из-за температуры, старения или кратковременных помех. Если к кристаллу добавляется масса, его электрические свойства изменяются.

На рис. 6.7. показан такой же график, что и на рис. 6.6, но для кристалла, покрытого толстой пленкой. Он потерял крутизну, имеющуюся на рис. 6.6. Т.к. подъем фазы меньше уклона, любая помеха в контуре осциллятора приведет к большему изменению частоты, чем в случае с новым кристаллом. В особых случаях начальная фаза / частоты кривой не поддерживается. Кристалл не может выдержать полный сдвиг фазы на  $90^\circ$ .

Импеданс  $Z$  может увеличиться до очень высоких значений. Если это происходит, осциллятор предпочтет колебания в резонансе с ангармонической частотой. Иногда эти усло-

вия встречаются только на короткий период, и колебания осциллятора возвращаются обратно и остаются между основной и ангармонической частотой или остаются ангармоническими колебаниями. Этот феномен известен как перескок моды. В дополнение к помехе при создании сигнала уровня это может привести к некорректному определению покрытия из-за скачка фазы. Важно, чтобы, несмотря ни на что, контроллер частоты продолжал работу в этих условиях. Это может происходить только за счет узнавания того, что толщина покрытия внезапно становится значительно меньше, т.е. через величину разницы частот между основной волной и ангармонической, полученной в ходе колебаний.

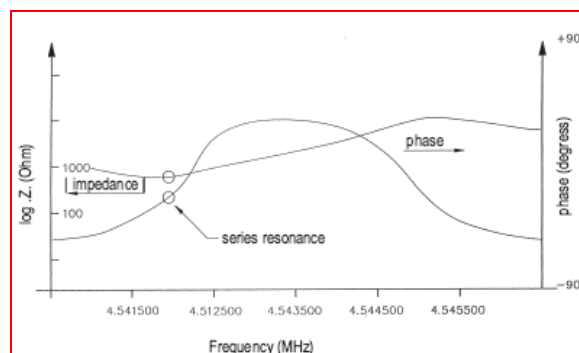


Рисунок 6.7. Осцилляции кристалла с толстой пленкой.

## 6.7 Синхронизированный осциллятор

INFICON разработал новую технологию для преодоления этих затруднений в активном осцилляторе. Новая система постоянно анализирует ответ кристалла на приложенную частоту: не только определяет частоту (последовательного) резонанса, но так же гарантирует, что колебания кварца остаются в нужном режиме. Новая система нечувствительна к перескоку моды и вытекающим из этого неточностям. Она быстрая и точная. Частота кристалла определяется 10 раз в секунду с точностью менее  $0,0005$  Гц.

Способность системы изначально определять и измерять определенный режим (моду) открывает новые возможности, благодаря преимуществам дополнительной информации об этих режимах. Эти новые, «интеллектуальные» устройства измерения используют свойства фазы/частоты кварцевого кристалла для определения частоты резонанса. Это работает за счет приложения синтезированной синусной волны определенной частоты к кристаллу и измерению разницы фаз между приложенным напряжением сигнала и током, текущим через кристалл. В случае последо-

вательного резонанса эта разница составляет единицы, тогда кристалл ведет себя как сопротивление (Ом). Путем отсоединения приложенного напряжения и тока, возвращающего от кристалла, фазовым компаратором можно определить приложенная частота находится выше или ниже точки резонанса кристалла.

Импеданс кристалла является емкостным при частотах ниже основной волны и индуктивным при частотах выше основной волны. Эта информация будет полезной, если частота резонанса кристалла неизвестна. Производится краткое качание частоты, пока фазовый компаратор не изменится и тем самым отметит резонанс. Для  $AT$  кварцев известно, что нижней полезной частотой является основная волна. Ангармоники расположены чуть выше. Эта информация не только очень важная для начала, но и в редких случаях, когда прибор «теряет» след основной волны. Определив один раз спектр кристалла, прибор может отслеживать сдвиг в частоте резонанса, постоянно выполняя измерения частоты и затем переводя их в толщину.

Использование «интеллектуальных» систем измерения имеет ряд очевидных преимуществ перед ранее использовавшимися активными осцилляторами, начиная с нечувствительности к перескоку моды, а так же скорости и точности измерений. Эта техника так же позволяет вводить сложные свойства, которые были невозможны при установке активных осцилляторов. Эти же устройства, что позволяют новой технологии определить основную волну с одного шага, могут так же использоваться для определения других режимов колебания, таких как ангармонический или квазигармонический. Прибор оборудован не только устройством для постоянного определения основной волны, но и может возвращаться назад на 2 или 3 режима (моды). Эта очередь различных режимов может иметь место для двух режимов с 10 Гц на одном и том же кристалле.

## 6.8 Автоматический $Z$ метод

При использовании уравнения 6.4 требуется, чтобы был известен акустический импеданс. Существует ряд случаев, когда необходимо найти компромисс с точностью из-за неполных знаний постоянных характеристик наносимых материалов:

1) значения  $Z$  твердого материала часто отличаются от значений для покрытия. Тонкие пленки очень чувствительны к параметрам технологического процесса, особенно в среде распыления. В результате, существ-

ующие значения для твердого материала не адекватны.

2) для большинства экзотических веществ, включая сплавы, значения  $Z$  неизвестны, и их нелегко определить.

3) часто необходимо выполнять точные измерения толщины покрытия для составных покрытий с помощью одного кристаллического сенсора. Это особенно используется в составных оптических или полупроводниковых покрытиях с высоким температурным коэффициентом  $T_c$ . Однако эффективные значения  $Z$  для смеси составных покрытий неизвестны.

Поэтому в таких случаях единственным эффективным методом является считать  $Z = 1$ , т.е. игнорировать реальность относительно распространения волны в многокомпонентных системах. Это некорректное предположение приводит к ошибкам в определении толщины и скорости. Влияние ошибки зависит от толщины покрытия и величины отклонения от действующего значения  $Z$ .

В 1989 А. Wajid изобрел **синхронизированный осциллятор**. Он предположил, что связь, существующая между основной волной и одной из ангармоник аналогична той, что была обнаружена Venes между основным колебанием и третьим квазигармоническим колебанием. Частоты основного и квазигармонического колебания очень похожи и они решают проблему емкости длинных кабелей. Он обнаружил необходимость рассмотрения для этих явлений в работах Wilson (1954), Tiersten и Smythe (1979).

Контур кристалла, т.е. сферическая форма с одной стороны, обладает эффектом разделения отдельных режимов друг от друга и в дальнейшем предотвращает передачу энергии из одного режима в другой. Обычным методом идентификации является назначение основного колебания как (100), нижнего ангармонического как (102) и следующего высшего ангармонического как (120). Эти три индекса номенклатуры режимы основаны на номере фазы обратного хода в волне движения вдоль трех осей кристалла. В упомянутых выше работах Wilson, Tiersten и Smythe проверили свойства режимов в ходе изучения влияния радиуса среза на положение ангармоник относительно основного колебания.

Если одна сторона кварца покрыта материалом, спектр резонанса сдвигается к нижним частотам. Были проведены наблюдения, что три упомянутых выше режима имеют небольшое отличие в чувствительности массы, и эксперимент относительно небольшого



другого изменения частоты. Эти отличия используются для определения значения  $Z$  материала. С помощью использования уравнений для отдельных режимов и исследуемых частот для режимов (100), (102) можно рассчитать отношение двух постоянных упругости  $C_{60}$  и  $C_{55}$ . Эти две постоянные упругости основаны на движении сдвига. Ключом в теории Wajid является следующее уравнение:

$$\frac{(C_{55}/C_{66})_{\text{coated}}}{(C_{55}/C_{66})_{\text{uncoated}}} \approx \frac{1}{(1+M \cdot Z)} \quad (6.5)$$

где,  $M$  – масса покрытия на кварце на единицу площади, coated – с покрытием, uncoated – без покрытия.

Является удачным совпадением, что произведение  $M\pi Z$  так же присутствует в уравнении Lu – Lewis (ур. 6.4). Его можно использовать для получения эффективного значения  $Z$  из следующего уравнения:

$$tg\left(M \cdot Z \cdot \pi \cdot \frac{F_c}{F_q}\right) + Z \cdot tg\left(\pi \cdot \frac{F_c}{F_q}\right) = 0 \quad (6.6)$$

Или

$$Z = -\frac{tg\left(M \cdot Z \cdot \pi \cdot \frac{F_c}{F_q}\right)}{tg\left(\pi \cdot \frac{F_c}{F_q}\right)}$$

Здесь  $F_q$  и  $F_c$  являются частотами кварца без и с покрытием в режиме (100) основной волны. Из-за неясности используемой математической функции, рассчитанное таким образом значение  $Z$  не всегда будет положительно определенной переменной. Это не имеет особого значения, т.к.  $M$  определяется другим способом через получение  $Z$  и измерение изменения частоты. Поэтому толщина и скорость нанесения покрытия рассчитываются друг за другом из известного значения  $M$ .

Необходимо понимать пределы использования этого метода. Т.к. определение  $Z$  зависит от изменения частоты двух режимов, любой минимальный сдвиг приведет к ошибке из-за механического или термического напряжения. Нет необходимости напоминать, что в таких условиях  $Z$  метод приведет к подобной ошибке. Однако, автоматическое определение значения  $Z$  в  $Z$  методе более надежно относительно возможных ошибок,

т.к. распределения амплитуды в режиме (102) является несимметричным на поверхности активного кристалла, а режим (100) является симметричным.

Из нашего опыта следует, что напряжения, возникающие в результате нанесения покрытия, оказывают более нежелательное влияние на кристалл. Это влияние особенно заметно при присутствии газов, т.е. при процессах напыления, реактивного осаждения в вакууме, испарения. Если известно значение  $Z$  для твердого материала, то лучше использовать его, чем определять автоматически  $Z$  отношение. В случае параллельного покрытия и последовательного покрытия лучше использовать автоматическое определение  $Z$ .

## 6.9 Регулирование толщины покрытия

Последним рассматриваемым здесь звеном является замкнутый контур блока измерения толщины покрытия, предназначенный оказывать влияние на рост покрытия при контролируемой (постоянной) скорости. Преимущества в измерении прибором, такие как скорость, точность, надежность, не будут полностью задействованы, если эта информация не будет подаваться в систему улучшения процесса измерения и мониторинга. Для процессов нанесения это означает, что скорость нанесения покрытия следует поддерживать максимально близкой к установленному значению блокировки и постоянной. Целью замкнутого контура является использование потока информации системы измерения для регулирования источников испарения соответствующим образом. Когда система работает корректно, контроллер передает небольшие отклонения контролируемых параметров (скорости) от установленного значения в корректных значениях параметра перенастройки испарения. Возможность контроллера быстро и точно измерять удерживает процесс от отклонения от заданных значений (блокировок).

Самым распространенным типом контроллера является  $PID$  контроллер:  $P$  обозначает пропорциональность,  $I$  – интеграл,  $D$  – дифференциал функций управления. Далее более подробно описаны некоторых функции контроллера.

Информация о поведении системы приходит в качестве ответов на свои при управлении в некоторых установках контроллера.

Этот ответ системы записывается, и затем вычисляются улучшенные параметры управления для нового теста. Эти действия выпол-



наются до тех пор, пока не будет достигнут удовлетворительный результат. В итоге контроллер оптимизирует значения так, что они точно подойдут характеристикам источника испарения.

Настройка контроллера для источника испарения является длительным и тщательным процессом, занимающим от нескольких минут часов для достижения удовлетворительного результата. Часто параметры, выбранные для определенной скорости, не подходят для измененной скорости. Следовательно, контроллер должен идеально настроить самого себя, как делают новые контроллеры в приборах измерения покрытий INFICON. В начале установки и соединения пользователь имеет прибор, измеряющий характеристики источника испарения.

Используется или *PID* контроллер в качестве основы для медленных источников или контроллер другого типа для быстрых источников без значимого времени задержки.

В соответствующей литературе сделано различие между тремя способами установки (настройки) контроллеров. В зависимости от того, какие данные используются для настройки, выделяют метод замкнутого контура, открытого контура и метод ответа резонанса.

Из-за простоты, с которой можно получить экспериментальные данные, предпочтительнее метод открытого контура. Более того, использование этого метода позволяет избежать работы методом проб и ошибок.

Функция Авто настройки управления Auto Control Tune, разработанная Inficon, характеризует процесс на основании его пошаговых ответов. После пошаговых изменений мощности результирующее изменение скорости как функции от времени будет сглажено и сохранено. Определяются важные пошаговые ответы (см. рис. 6.8). В общем, невозможно характеризовать все процессы точно, поэтому приходится принимать несколько приближений. Обычно принимается, что динамические характеристики можно воспроизводить с помощью процесса первого порядка плюс время задержки. Преобразование Лапласа для этого предположения (преобразование в  $s$  плане) будут следующими:

$$\frac{Output}{Input} = \frac{K_p \cdot 10^{-L}}{\tau \cdot s + 1} \quad (6.8)$$

где

$K_p$  = увеличение в стационарном состоянии,

$L$  = время задержки,  
 $\tau$  = постоянная времени,  
*output* – выход,  
*input* – вход.

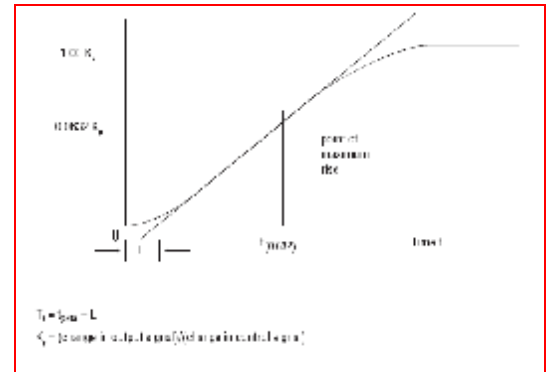


Рисунок 6.8. Ответ процесса на пошаговое изменение с  $t = 0$  (открытый контур, усиленный сигнал управления)

Эти три параметра определяются через кривую ответа процесса. Была сделана попытка с помощью нескольких методов рассчитать требуемые параметры ответа системы из кривой, показанной на рис. 6.8. Это приводит к одной точке 63,2% перехода (постоянная времени) экспоненциальному взвешенному соответствию согласно методу наименьших квадратов. Процесс достаточно характеризуется этой информацией, так что можно применить алгоритм контроллера. Уравнение 6.9 представляет преобразование Лапласа для наиболее часто используемых *PID* контроллеров:

$$M(s) = K_c \cdot \left( 1 + \frac{S}{T_i} + T_d \cdot S \right) \cdot E(s) \quad (6.9)$$

где

$M(s)$  - управляемая переменная или мощность,

$K_c$  - усиление управления (пропорциональность),

$T_i$  - время интеграции,

$T_d$  - время дифференциации,

$E(s)$  - отклонение процесса.

На рис. 6.9 показан алгоритм управления и процесс с фазовым сдвигом первого порядка и время задержки. Динамика устройства измерения и управляющих элементов (в нашем случае испаритель и источник питания).  $R(s)$  соответствует установке (блокировке) скорости. Механизм возврата является отклонением, создаваемым между измеренной скоро-

стью осаждения  $C(s)$  и блокировкой скорости  $R(s)$ .

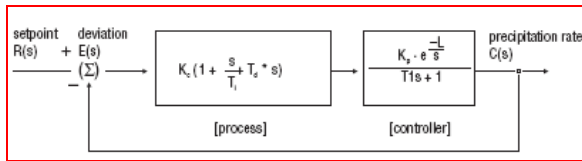


Рисунок 6.9. Блок-схема  $PID$  контроллера.

Ключом к использованию любой системы управления является выбор корректного значения для  $K_c$ ,  $T_d$  и  $T_i$ . «Оптимальное» управление является термином, который делает понятным за счет присутствия различных математических определений:

Обычно наименьшая квадратичная ошибка  $ISE$  (общая квадратичная ошибка) используется как мера качества управления:

$$ISE = \int e^2(t) \cdot dt \quad (6.10)$$

Здесь  $e$  является ошибкой (отклонением):  $e =$  уровнем блокировки минус измеренное значение.  $ISE$  является относительной нечувствительностью к малым отклонениям, но большие отклонения способствуют значительному увеличению значения интеграла. Результат является небольшим выходом за пределы, но длительное колебание времени из-за отклонений, происходящих позже, незначительно влияют на интеграл.

Интеграл абсолютного значения отклонения  $IAE$  так же является мерой качества управления:

$$IAE = \int |e(t)| \cdot dt \quad (6.11)$$

Он более чувствителен к небольшим отклонениям, но менее чувствителен к большим отклонениям, чем  $ISE$ .

Graham и Lanthrop ввели интеграл по времени, умноженный на абсолютную ошибку  $ITAE$  как меру качества управления:

$$ITAE = \int t \cdot |e(t)| \cdot dt \quad (6.12)$$

$ITAE$  чувствителен к начальным и, на некотором промежутке, неизбежным отклонениям. Оптимальные ответы управления, последовательно определенные через  $ITAE$ , имеют короткое время ответа и большие выходы за пределы, чем при использовании других двух критериев. Однако,  $ITAE$  оказы-

вается очень полезным при расчете регулирования процессов нанесения покрытий.

### Автоматическая настройка управления

Auto Control Tune производства INFICON основана на измерениях системы ответа с открытым контуром. Характеристика системы ответа вычисляется на основании пошагового изменения сигнала управления. Он определяется экспериментально через два вида кривых соответствующих двум точкам. Это можно сделать быстро со случайным уровнем или более точно, выбрав уровень близкий к желаемому уровню блокировки. Т.к. время ответа зависит от положения системы (в нашем случае от скорости роста покрытия), лучше будет измерить вблизи нужной рабочей точки. Информация о процессе, измеренная таким образом (усиление процесса,  $K_p$ , постоянная времени  $T_1$  и время задержки  $L$ ) используются для создания наиболее подходящих параметров  $PID$  контроллера.

Наилучшие результаты в расчете блоков управления покрытиями достигаются с помощью  $ITAE$ . Существует выход за пределы, но реакции быстрая, а колебание времени короткое. Условия настройки контроллера работают для всех критериев интегрального вычисления таким образом, чтобы минимизировать соответствующие отклонения. При ручном вводе с экспериментальным определением коэффициентов ответа процесса идеальные  $PID$  коэффициенты можно легко получить из уравнений 6.13, 6.14 и 6.15:

$$K_c = \left( \frac{1.36}{K_p} \right) \cdot \left( \frac{L}{T_1} \right)^{-0.947} \quad (6.13)$$

$$T_i = \left( \frac{1.19}{T_1} \right) \cdot \left( \frac{L}{T_1} \right)^{0.738} \quad (6.14)$$

$$T_d = (0.381 \cdot T_1) \cdot \left( \frac{L}{T_1} \right)^{0.995} \quad (6.15)$$

Для медленных систем временной интервал между принудительными изменениями управляющего напряжения увеличен, чтобы избежать передачи контроллера (передача – быстрый рост сигнала управления без возможности системы ответить или изменить сигнал). Это дает ответ на предварительное изменение в настройках контроллера и возможности «силовых» настроек контроллера. Другим преимуществом является большая нечувствительность к помехам процесса из-за того, что данные, ис-

пользуемые для управления, не берутся просто из одного измерения, а из нескольких, так что используется свойство накопления массы кварцевым кристаллом.

В процессах с короткими временами ответа (короткие постоянные времени) и небольшими (не измеряемыми) временами задержки, PID контроллеру часто бывает сложно справиться с помехами процесса нанесения покрытия (отклонение луча, быстрое тепловое короткое замыкание между расплавом и испарителем). В этом случае с успехом используется алгоритм типа интегрального восстановления. Этот контроллер всегда интегрирует отклонение и направляет систему в сторону нулевого отклонения. Этот метод работает с небольшими или полностью неизмеримыми временами задержки. Однако, если это используется с заметным фазовым сдвигом или временем задержки, контроллер будет стараться создать колебания, т.е. это перекомпенсировать сигнал управления до того, как у системы будет шанс дать ответ. Авто-настройка управления распознает свойства этих быстрых систем во время измерения пошагового ответа и использует информацию для расчета усиления управления для не-*PID* алгоритмов управления.

## 6.10 Модели приборов INFICON

Выпускаемые модели приборов различаются по программному и аппаратному обеспечению, простейший прибор ХТМ/2 предназначен только для измерения или отображения и не может управлять процессом нанесения покрытия в вакууме.

Группа ХТС/2 и ХТС/С может управлять источником вакуумного покрытия и до трех различных покрытий процесса (не смешивается 9 различных программ нанесения покрытия). Приборы ХТМ/2, ХТС/2, ХТС/С не оборудованы функциями автоматического нуля Auto zero и авто-настройки Auto tune, поэтому одновременное измерение с нескольких сенсоров и одновременное управление двумя источниками вакуумного покрытия невозможно.

IC/5 предлагает все доступные на сегодня и удобные функции: измерение с помощью 8 сенсоров с функциями автоматического нуля Auto zero и авто-настройки Auto tune, а так же возможностью одновременного управления двумя источниками испарения. Более того, он предлагает 24 программы для материалов, в которых можно запрограммировать 50 процессов с 250 покрытиями. Для простоты работы и предотвращения ошибок прибор оборудован дисководом. К нему можно подсоединить все типы держателей кристалла. Разрешение по толщине составляет около 1 Å, разрешение по скорости для скоростей 0...99,9 Å/c составляет 0,1 Å/c, а для скоростей 100...999 Å/c – 1 Å/c. Самой привлекательной опцией контроллера IC/5 является плата микро-баланса с высоко стабильным опорным кварцем. Этот осциллятор в 50 раз надежнее стандартного осциллятора. Длительная стабильность и точность составляют 2 ppm на всем диапазоне температур. Эта опция специально разработана для нанесения покрытий материалов с низкой плотностью и при низких скоростях нанесения покрытия. Это важно, например, для изучения процессов сорбции и загрязнения космического пространства.



## 7 Применение вакуумной технологии для нанесения покрытий

### 7.1 Метод нанесения покрытий в вакууме

Вакуумная технология широко используется в промышленных технологических процессах в течение двух последних десятилетий. Некоторые из этих процессов и их типовые диапазоны давлений представлены на рис. 7.1.

Т.к. обсуждение всех процессов выходит за рамки данной книги, в этом разделе приводится описание нескольких примеров применения в наиболее важных областях технологии нанесения покрытий.

Нанесение тонких пленок используется для изменения свойств поверхности основного материала, подложки. Например, оптические свойства, такие как передача или отражение линз и других стеклянных компонентов, можно настроить путем применения системы подходящих слоев покрытий. Металлические покрытия пластиковой пленки создают проводниковые покрытия для пленочных конденсаторов. Полимерные слои на металлах увеличивают коррозионную стойкость подложек.

Благодаря использованию вакуума возможно создание покрытий с высокой степенью однородности толщины в диапазоне от нескольких нанометров до более, чем 100 мкм, с обеспечением хорошей повторяемости свойств покрытия. Плоские подложки, рулоны и ленты, а так же комплексные рельефные пластиковые компоненты можно покрывать без проблем с материалом подложки. Например, можно покрывать металлы, сплавы, стекло, керамику, пластмассы, бумагу. Можно использовать различные материалы для покрытия. В дополнение к покрытиям металлов и сплавов слои можно создавать из различных химических веществ или слоев из различных материалов, нанесенных один на другой (как сэндвич). Значительным преимуществом вакуумных покрытий над другими методами является тот факт, что можно получить любые требуемые специфические свойства покрытия, такие как структура, прочность, электрическая проводимость, индекс отражения за счет выбора метода нанесения покрытия и параметров процесса для определенных наносимых покрытий.

### 7.2 Источники покрытий

Во всех методах вакуумного нанесения покрытия слои формируются за счет нанесения материала из газовой фазы. Наносимые материалы могут формироваться за счет физических процессов, таких как испарение, распыление, или за счет химических реакций. Поэтому выделяют физическое и химическое нанесение:

\* физическое осаждение паров PVD

\* химическое осаждение CVD

#### 7.2.1 Тепловые испарители (кассеты, провода)

В процессе испарения наносимый материал нагревается до температуры, достаточно высокой для достижения весьма высокого давления паров и установления нужного испарения или уровня конденсации. Простейшие источники, используемые при испарении, состоят из катода, кассеты листового металла или электропроводной керамики, которые нагреваются за счет прохождения через них электрического тока (рис.7.2). Однако существуют затруднения, связанные с типом нагреваемого материала. В некоторых случаях невозможно достичь необходимой температуры испарителя без значительного испарения держателя источника и, следовательно, загрязнения покрытия. В дальнейшем могут произойти химические реакции между держателем и испаряемым материалом, что приведет к снижению срока службы испарителя или загрязнению покрытия.

#### 7.2.2 Электронно-лучевые испарители (пушка)

Чтобы испарить наносимый материал с использованием электронно-лучевой пушки, материал, который удерживается в тигле с водяным охлаждением, бомбардируется сфокусированным электронным лучом и там разогревается. Т.к. тигель остается холодным, в принципе, загрязнение покрытия материалом тигля не происходит, и достигается высокая степень чистоты покрытия. При сфокусированном электронном луче можно получить очень высокую температуру и, следовательно, очень высокую скорость испарения. В результате в дополнение к металлам и сплавам можно испарять такие термостойкие компоненты, как оксиды. За счет изменения мощности электронного луча можно легко и быстро управлять скоростью испарения.





### 7.2.3 Катодное распыление

В процессах катодного распыления твердотельная мишень бомбардируется ионами с высокой энергией в газовом разряде (рис. 7.3). Ударяющиеся ионы передают их кинетическую энергию атомам в материале мишени за счет соударения. Эти высвобожденные атомы – частицы распыления – конденсируются на подложке, расположенной напротив мишени. По сравнению с частичками испарения частички распыления имеют намного большую кинетическую энергию. Поэтому условия для конденсации и роста слоев в этих двух процессах сильно различаются. Слои, полученные в результате распыле-

ния, имеют более высокую прочность сцепления (силу адгезии) и более плотную структуру покрытия по сравнению со слоями, полученными при испарении. Распыляемые катоды выпускаются различной геометрической формы, размеров и конфигурации электрических контуров. Все распыляемые катоды, в общем, имеют большие области источника частиц по сравнению с испарителями и могут покрыть большие подложки с высокой степенью однородности. Здесь в качестве наносимых материалов могут использоваться металлы, сплавы любых составов, а так же оксиды.



Рисунок 7.1. Диапазоны давления технологических вакуумных процессов

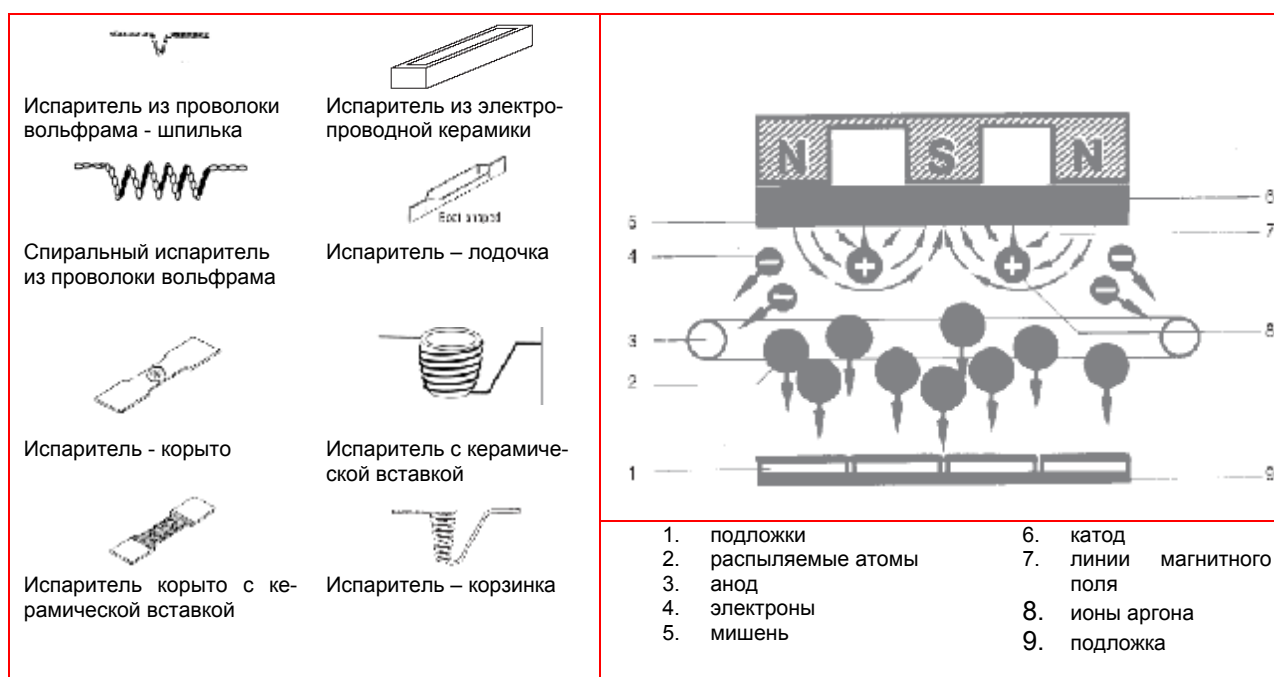


Рисунок 7.2. Различные тепловые испарители

Рисунок 7.3. Схема катодного распыления

## 7.2.4 Химическое осаждение

По сравнению с методами PVD, когда наносимое вещество является твердым телом или жидкостью, при химическом осаждении это вещество уже присутствует в газовой среде, когда попадает в вакуумную систему. Чтобы осадить его, вещество должно быть подвергнуто тепловому воздействию, т.е. за счет высокой температуры или плазмы. Обычно в процессах этого типа происходит большое количество химических реакций, некоторые из которых дают преимущества при управлении желаемым составом и свойствами покрытия. Например, кремневодородные мономеры, мягкие Si-H покрытия или – при добавлении кислорода – кварцевые покрытия могут создаваться через управляющие параметры процесса.

## 7.3 Технология вакуумного нанесения покрытий / напылительные установки

### 7.3.1 Нанесение покрытий на отдельные компоненты

Для прессованных пластиковых компонентов методы вакуумного нанесения покрытия с успехом заменяют методы конвекционного нанесения покрытий, такие как гальванические (электроосаждение). Например, используя методы вакуумного нанесения можно создавать зеркальную поверхность покрытий автомобильных отражателей, пластиковых предметов в фурнитуре, декорировании, часах, а так же покрытых металлом и оптическими эффектами создаются для украшения.

На рис. 7.4 показана вакуумная система, в которой большие группы пластиковых компонентов покрываются одновременно. Подложки помещаются в клетку, которая вращается вокруг источника покрытия, например, распыляемого катода. В некоторых процессах, с помощью использования тлеющего разряда подложки очищаются и активируются перед процессом нанесения покрытия. Это улучшает прочность сцепления и повторяемость свойств покрытий. После распыления можно применить антикоррозионное покрытие. В этом случае пар мономера напускается в систему и зажигается высокочастотный плазменный разряд. Мономер активируется в плазме и осаждается на подложку в виде полимерного покрытия. В системах этого типа в клетке могут быть пластиковые подложки с площадью поверхности до нескольких  $10 \text{ м}^2$ , приводящие к высокой десорбции потока газа. Вакуумные системы должны иметь возможность поддерживать требуемые давле-

ния, несмотря на высокие газовые нагрузки. В качестве примера показана система, которая откачивается комбинацией форвакуумного насоса и насоса Рутса. Диффузионный насос с холодной шапкой образует систему высоковакуумной откачки. Холодные поверхности откачивают большое количество паров и летучих веществ, выпускаемых пластиковыми компонентами, тогда как диффузионный насос в основном удаляет неконденсируемые, инертные газы, необходимые для процесса распыления.

Совершенно иная концепция для тех же ступеней процесса представлена на рис. 7.5. система состоит из 4 отдельных станций, вращающихся вокруг вертикальной оси с 4 камерами с подложками и технологической станцией, расположенной в вакуумной камере. Во время вращения камера подложек перемещается из станции загрузки/ выгрузки к станции предварительной обработки, потом к станции металлизации, к станции защитного покрытия и опять к начальной позиции. Т.к. каждая станция имеет собственную систему откачки, все 4 процесса могут идти одновременно с независимой настройкой параметров процесса. Вакуумная система состоит из турбомолекулярного насоса и набора форвакуумных насосов: Рутса и пластинчатороторных.

### 7.3.2 Нанесение покрытий на компоненты в рулонах

Покрытие металлом пластиковых материалов и бумаги в рулонах играет важную роль в упаковке продуктов питания. Такие материалы сохраняют продукты при хранении и транспортировке согласно требованиям логистики и придают упаковке привлекательный вид. Другой важной областью применения металлизированных пленок является производство пленочных аккумуляторов/ конденсаторов для использования в электронике. Металлизация выполняется в вакуумных системах для обработки пленочных материалов. На рис. 7.6 показана типовая схема. Блок состоит из двух камер, камеры намотки с рулоном обрабатываемой пленки и системой намотки, а так же камеры покрытия, где расположены испарители. Две камеры отделены друг от друга уплотнением за исключением двух щелей, через которые проходит пленка. Это дает возможность откачивать большие газовые нагрузки из-за рулона пленки, используя относительно маленькую систему откачки. Давление в камере намотки может быть в 100 раз выше, чем в давление, присутствующее в этот момент в камере нанесения покрытия. Система откачки камеры намотки обычно состоит из комбинации насоса Рутса и пластинчато-ротаторного насоса.



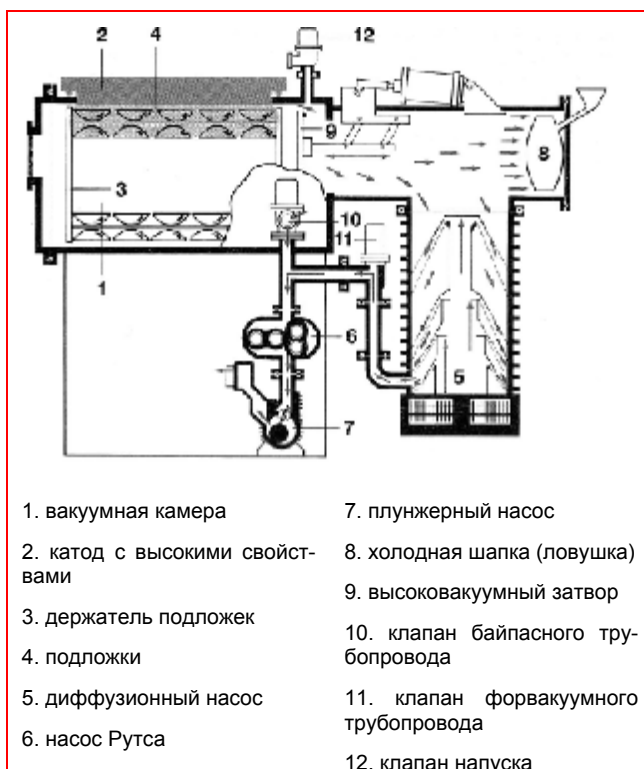


Рисунок 7.4. Схема системы ванны для нанесения покрытий на компоненты

Для сильно дегазирующих рулонов бумаги в камере намотки необходимо установить охлаждающую ловушку, которая будет работать как насос для паров воды. Рулоны пленки или бумаги обычно имеют диаметр 400...1000 мм и ширину 400...3000 мм. Для намотки и размотки требуются прецизионные системы намотки с электронным управлением.

Во время нанесения покрытия пленка, двигаясь со скоростью более 10 м/с, проходит группу испарителей, состоящих из керамических кассет, из которых испаряется алюминий. Чтобы достичь необходимой толщины Алюминиевого Al - покрытия на пленке при такой скорости, требуется очень высокая скорость испарения. Испаритель должен работать при температуре, превышающей 1400°C. Тепловое излучение испарителя вместе с теплом конденсации растущего слоя приводит к значительной тепловой нагрузке на пленку. С помощью охлаждающих роликов фольга охлаждается во время и после нанесения, так что она не повреждается во время нанесения и достаточно охлаждается перед намоткой.

Во время процесса нанесения толщина покрытия непрерывно измеряется с помощью оптической системы измерения или устройств измерения электрического сопротивления. Измеренные значения сравниваются с



Рисунок 7.5. Многокамерный блок покрытия компонентов (симметрично вращающаяся поточная система DynaMet4V)

установленными значениями толщины (блокировки), и мощность испарителя автоматически регулируется.

### 7.3.3 Нанесение покрытий на оптические компоненты (оптические покрытия)

Вакуумные покрытия имеют широкий диапазон применения при производстве оптической оптики, линз для камер и фотоаппаратов и других оптических приборов, а так же оптических фильтров и специальных зеркал. Чтобы получить желаемые свойства перехода или отражения на стеклянную или пластиковую подложку наносят как минимум три, а иногда и 50 покрытий. Свойства покрытий, такие как толщина и коэффициент отражения должны управляться очень точно и подходить друг другу. Большинство этих покрытий создаются с использованием электронно-лучевого испарения в однокамерных системах (рис. 7.7). Испарители устанавливаются в нижней части камеры, обычно с автоматически открывающимися тиглями, в которых находятся различные материалы. Подложки установлены на вращающемся своде над испарителями. Использование подходящих экранов совмещенных с относительным перемещением между испарителями и подложками, приводит к очень высокой степени однородности покрытия. С помощью

кварцевых измерителей толщины покрытия (раздел 6) и прямого измерения полученных оптических свойств во время нанесения по-



Рисунок 7.6. Схема вакуумной системы нанесения покрытия на пленочные материалы

Ключевым требованием к покрытию является то, чтобы они сохраняли свои свойства в условиях обычной окружающей среды в течение длительного времени. Это требует создания очень плотных покрытий, в которые ни кислород, ни вода не смогут проникнуть. При использовании стеклянных линз это достигается за счет поддержания температуры подложки до  $300^{\circ}\text{C}$  во время нанесения покрытия за счет излучения нагревателя. Однако пластиковые линзы, которые используются для глазной оптики, не могут выдерживать температуру выше  $80^{\circ}\text{C}$ . чтобы получить плотное, стабильное покрытие эти подложки бомбардируют ионами Ag из источника ионов во время нанесения покрытия. При ионной бомбардировке правильное количество энергии используется для растущего слоя так, что покрывающие частицы переходят на энергетически более выгодную структуру без повышения температуры подложки выше максимальных значений. В тоже время в аргон можно добавить кислород. Получающиеся ионы кислорода очень реактивны и гарантируют, что кислород будет включен в растущий слой в нужном количестве.

Вакуумные системы для нанесения таких покрытий обычно состоят из системы форвакуумной откачки из насосов Рутса и пластинчато-роторного а так же системы высоковакуумной откачки. В зависимости от требований, здесь могут использоваться крионасосы диффузионные или турбомолекулярные насосы в большинстве случаев вместе с большими охлажденными поверхностями (рефрижераторами). Насосы должны устанавли-

ваться и защищаться с помощью экранов для того, чтобы никакие наносимые материалы не могли попасть в насосы и нагреватели системы, чтобы не привести к перегреву системы. Такое экранирование всегда снижает эффективную быстроту действия, поэтому производители системы должны выбрать подходящий компромисс между эффектами экранирования и снижением быстроты действия.

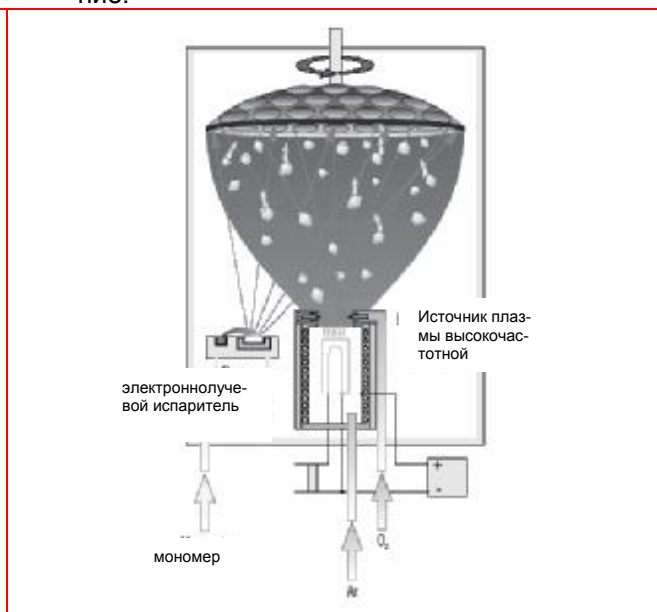


Рисунок 7.7. Блок покрытия систем нанесения оптических покрытий

ваться и защищаться с помощью экранов для того, чтобы никакие наносимые материалы не могли попасть в насосы и нагреватели системы, чтобы не привести к перегреву системы. Такое экранирование всегда снижает эффективную быстроту действия, поэтому производители системы должны выбрать подходящий компромисс между эффектами экранирования и снижением быстроты действия.

### 7.3.4 Нанесение покрытий на стекло

Нанесение покрытий на стекла играет очень важную роль в ряде областей применения: изготовление окон для зон умеренного и холодного климата обеспечивающих за счет покрытия отражение тепла и снижение стоимости тепла, в странах с высоким солнечным излучением используют солнцезащитные покрытия, снижающие стоимость кондиционирования воздуха, тонирование стекол автомобилей для снижения нагрева салона и покрытие автомобильных зеркал. Большинство этих покрытий изготавливаются в больших поточных вакуумных системах. На рис. 7.8 показан пример типовой системы. Отдельные стеклянные панели поступают в камеру подачи при атмосферном давлении. После подачи клапан закрывается, затем камера откачивается системой форвакуумной откачки. Как только давление снизится до нужного уровня, может открыться клапан для откачки камеры передачи. Стекло перемещается в камеру передачи, а оттуда при постоянной скорости – в технологическую камеру, где

происходит процесс нанесения покрытия с использованием катодного распыления. Со стороны выхода по аналогии существует ка-

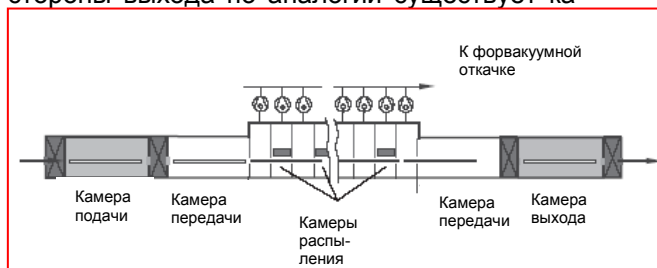


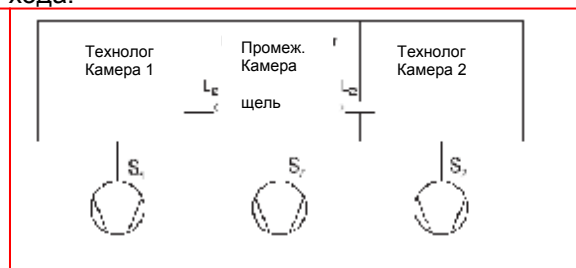
Рисунок 7.8. Система для нанесения покрытия на стекло 3-камерная поточная система, производительность 3 600 000 м<sup>2</sup>/год

Большинство покрытий состоит из слоев металла или оксида. Т.к. металлические слои нельзя загрязнять кислородом, отдельные стадии процесса приходится изолировать друг от друга стадией передачи. Использование клапанов для разделения технологических камер нежелательно, т.к. это ведет к увеличению размеров установки. Чтобы избежать частых и нежелательных запусков и остановок стекла, технологические камеры отделяются вакуумом через так называемые «щелевые замки», т.е. постоянно открытые щели вместе с промежуточными камерами со своим собственным вакуумным насосом (рис. 7.9). Зазоры в щелях поддерживаются на минимальном технически возможном уровне чтобы минимизировать зазор и проводимость при транспортировке стекла через них. Быстрота действия в промежуточной камере поддерживается максимально высокой, чтобы достичь давления в промежуточной камере ниже чем в технологической. Это низкое давление сильно снижает поток газа из технологической камеры в промежуточную и расположенную рядом технологическую. Для каждого разделения может потребоваться размещение нескольких промежуточных камер между двумя технологическими.

Процесс нанесения покрытия на стекло требует высоких газовых потоков для процесса распыления и низкой концентрации углеводородов. Единственными насосами, удовлетворяющими этим требованиям при стабильной быстроте действия являются турбомолекулярные насосы, которые используются почти всегда.

При постоянной откачке технологических и промежуточных камер, камеры загрузки и выгрузки могут периодически напускаться и откачиваться снова. Из-за больших объемов этих камер и короткого времени цикла, необходима высокая быстрота действия. Она

мера передачи, в которую потом поступает стекло и откуда оно передается в камеру выхода.



$L_{12}$ ,  $L_{22}$  – проводимость между промежуточной камерой и технологическими камерами 1 и 2,  
 $S_z$  – быстрота действия в промежуточной камере  
 $S_1$ ,  $S_2$  – быстрота действия в технологических камерах 1 и 2

Рисунок 7.9. принцип разделения камер через ступени давления

обеспечивается комбинацией пластинчатороторных насосов и насосов Рутса. Для очень коротких циклов используют насосы Рутса с охлаждением газа.

Все главные функции системы, такие как транспортировка стекла, управление откачкой, распылением, выполняются в полностью автоматическом режиме. Это единственный способ обеспечения высокой производительности при высоком качестве покрытий.

### 7.3.5 Установки для производства компакт-дисков

Покрытия для магнитных и магнитооптических сред хранения данных обычно состоят из нескольких функциональных покрытий, которые используются для механически полированных (обработанных) дисков. Если несколько дисков помещаются на один общий носитель, процессы нанесения покрытия можно выполнять в системах аналогичных тем, которые используются при нанесении покрытий на стекла. Однако большинство дисков должны покрываться с обеих сторон и требуется более низкое загрязнение поверхности чем для покрытия на стекле. Поэтому поточные системы для записи данных используют вертикальные носители, которые проходят через систему (рис. 7.10). Распыляемые катоды должны устанавливаться с обеих сторон носителя, так что обе стороны дисков будут покрываться одновременно.

Для одностороннего покрытия дисков применяется другой метод. В этом случае различные технологические станции выстраиваются вокруг вакуумной камеры (рис. 7.11). Диски по отдельности поступают из магазина к транспортировочному роботу (руке). Транспортный робот передает диски из одной станции в другую. Во время цикла пере-

дачи все процессы выключаются, а станции соединяются друг с другом через вакуум. Как только робот достигает рабочей позиции, отдельные станции отделяются друг от друга через уплотнения. Каждая станция откачивается с помощью собственного турбомолекулярного насоса, и начинается выполнение отдельного процесса. Т.к. в системе есть много технологических станций, то парал-

лельно может выполняться несколько процессов. Путем разделения технологических станций через уплотнение, можно получить отличное вакуумное разделение. Однако, т.к. самая медленная стадия процесса определяет интервал времени, то две технологические станции возможно использовать для процессов, длящихся примерно одинаковое время.

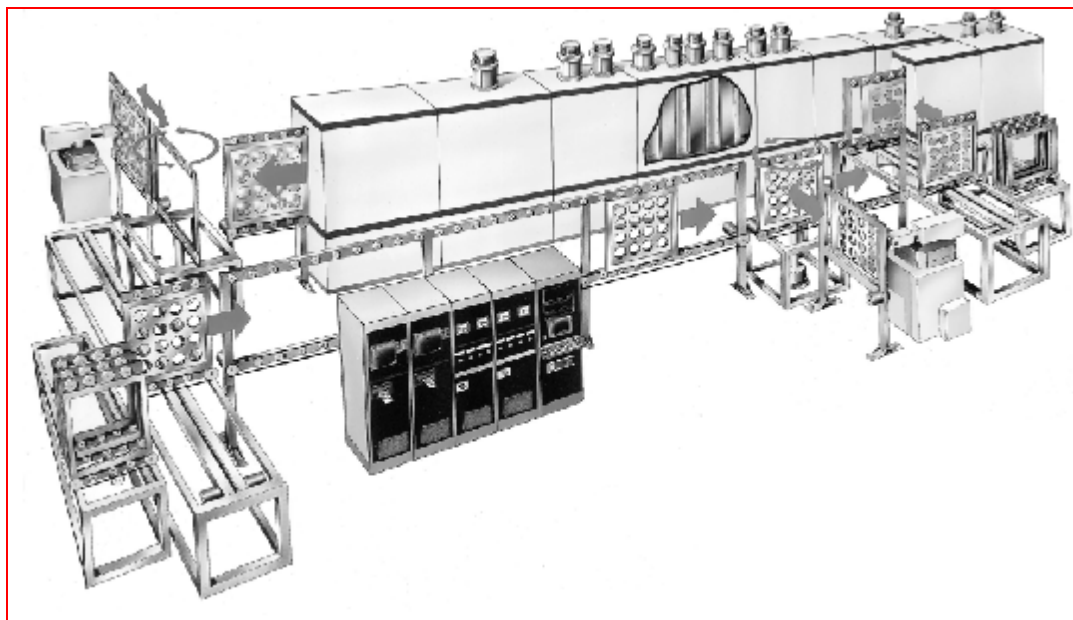


Рисунок 7.10. Установка для нанесения покрытий на компакт-диски с транспортно-вакуумной системой

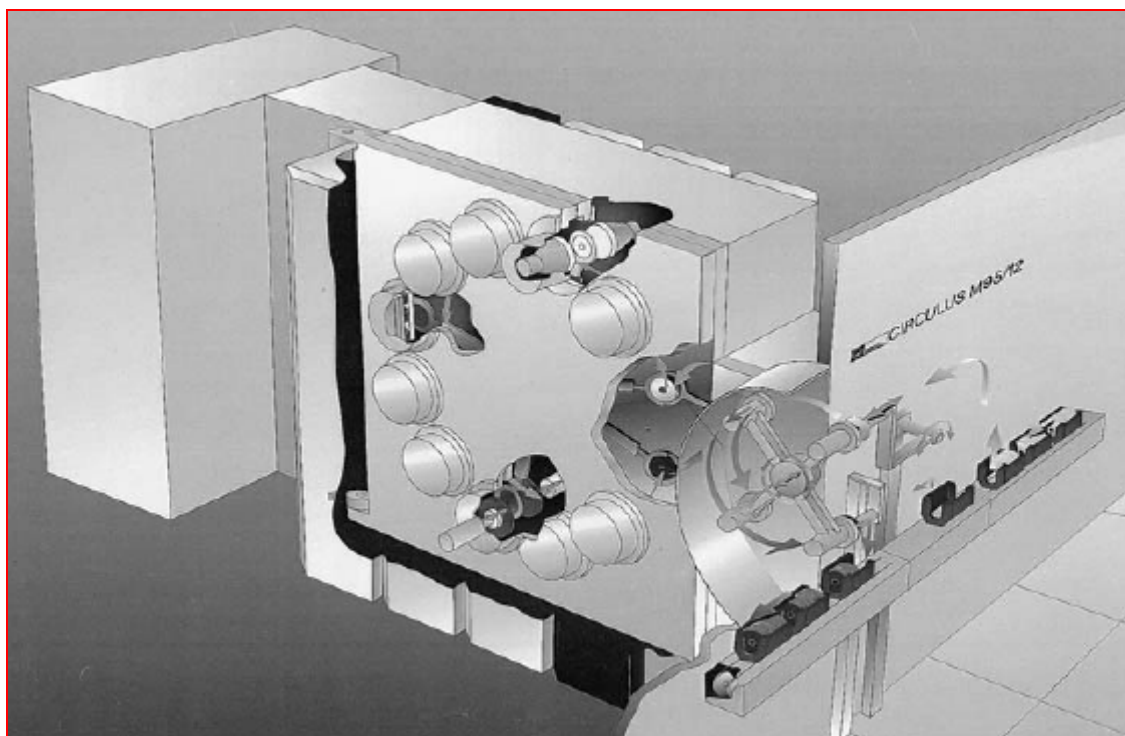


Рисунок 7.11. Установка для нанесения покрытий на отдельные компакт-диски

## 8 Рекомендации по работе с вакуумным оборудованием

### 8.1 Причины неисправностей, когда указанное предельное давление не достигается, или достигается слишком медленно

Если необходимое предельное давление не достигается во всей вакуумной системе, или если достигается после слишком длительного периода откачки, по это может происходить по следующим причинам.

Если необходимое предельное давление не достигается:

- \* оборудование загрязнено или в нем есть течи,
- \* насос загрязнен или неисправен,
- \* вакуумметр неисправен.

Если необходимое предельное давление достигается после слишком длительной откачки:

- \* оборудование загрязнено,
- \* трубопровод откачки засорен,
- \* насос загрязнен или слишком маленький,
- \* быстрота действия снижена по другим причинам.

Чтобы обнаружить неисправность обычно отделяют камеру от системы откачки и проверяют отдельно камеру на наличие течей и загрязнений, используя, например, метод повышения давления. Если выяснится, что камера не содержит дефектов, тогда проверяют измерительную систему на загрязненность (раздел 8.3.8) и при необходимости проверяют саму систему откачки или насос.

### 8.2 Загрязнение вакуумных камер и устранение загрязнений

В дополнение к методу повышения давления (раздел 6.1) существует метод определения загрязнений, основанный на том, что конденсируемые пары обычно считаются основным компонентом газовой смеси в загрязненных камерах. Здесь показания компрессионного вакуумметра (парциальное давление неконденсируемых газов) сравнивается с показаниями электрического вакуумметра, т.е. ио-

низационного или теплопроводного (измеряют общее давление). Однако эти два вакуумметра должны быть чистыми. Когда присутствуют пары, компрессионный вакуумметр покажет лучшее давление, чем электрический. Это будет являться верным знаком того, что стенки камеры загрязнены, обычно маслом. Другой широко используемой процедурой является сравнение показаний одного и того же вакуумметра (не компрессионного) с и без вставки охлаждающей ловушки в трубопровод. Заливка жидкого азота в ловушку приведет к падению давления примерно на порядок или более, если камера загрязнена парами, которые намерзнут на ловушку.

#### Удаление загрязнений со стеклянного оборудования

Если загрязнения выражаются в высоком давлении паров, то их можно относительно быстро откачать. Если этого недостаточно, тогда придется очистить оборудование. Загрязненные стеклянные приборы сначала промывают смесью хромовой и серной кислот, или при необходимости с добавлением разбавленной плавиковой кислоты (1:30). Затем следует промывка дистиллированной водой. Если это не дает желаемого результата, тогда используются органические растворители. Затем стеклянные компоненты промывают дистиллированной водой или метанолом (не используйте денатурат!).

#### Удаление загрязнений с оборудования из металла

Металлические компоненты обычно бывают загрязнены следами масел и смазочных материалов. Если они не удаляются в ходе откачки, тогда для очистки используют соответствующие органические растворители (денатурат не подходит). Максимальную чистоту можно получить с помощью паровых ванн, которые широко используются в промышленности. Если необходимо получить очень низкое давление ( $<10^{-7}$  мбар), тогда после очистки металлические компоненты необходимо подвергнуть прогреву при температуре до 200°C. Сильно загрязненные металлические компоненты сначала придется очищать с помощью механической или пескоструйной обработки верхнего слоя поверхности. Эти методы имеют недостатки, т.к. может увеличиться площадь поверхности за счет повышения шероховатости, могут образоваться активные центры, которые смогут адсорбировать молекулы паров. Поэтому предпочтительна обработка в паровой ванне. В некоторых случаях желательно использовать электролитическое травление поверхности. Для высоковакуумных компонентов необходимо обращать внимание на то, чтобы электролитическое травление не привело к эрозии материала, что значительно увеличит площадь



поверхности. После пескоструйной обработки компонентов, работающих в областях низкого и среднего вакуума, нет необходимости полировать поверхности, т.к. при этих режимах давления состояние поверхности не играет особой роли.

### 8.3 Общая информация по работе с вакуумными насосами

Если в вакуумной камере или измерительной системе не обнаружено дефектов, или если система работает неудовлетворительно после устранения неисправностей, тогда сначала следует проверить уплотнения фланцевых соединений на насосе и работоспособность клапанов и затворов. Уплотнения фланцев следует заменить, если они текут в результате царапин или механических повреждений, которые вначале казались незначительными. Если и здесь нет дефектов, то необходимо проверить, проходил ли насос техническое обслуживание так, как указано в руководстве по эксплуатации.

В этом разделе приведены общие рекомендации по обслуживанию насосов, чтобы избежать их поломок. Так же обсуждаются возможные ошибки и их последствия.

#### 8.3.1 Пластинчато-роторные насосы с масляным уплотнением

##### 8.3.1.1 Расход масла, загрязнение масла и его замена

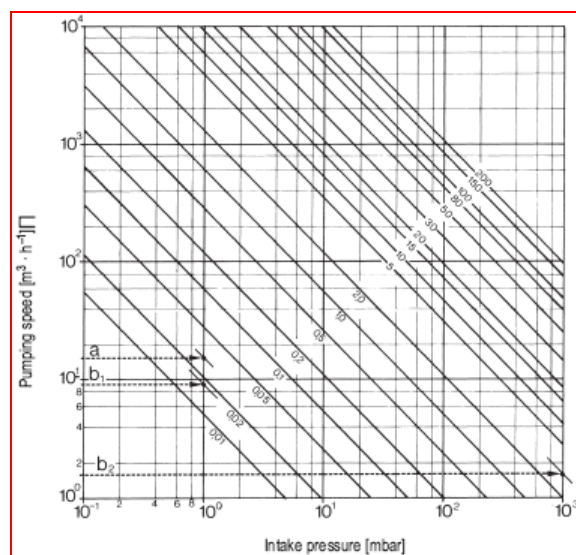
Масло служит для:

- \* смазки движущихся частиц,
- \* отделения движущихся частиц от атмосферного давления,
- \* уплотнения клапанов,
- \* заполнения мертвого пространства под клапаном,
- \* отделения рабочих объемов друг от друга.

Во всех насосах можно проверить уровень масла во время работы через смотровые окна с уровнем масла. Во время непрерывной работы необходимо проверять, чтобы уровень масла не опускался ниже минимального. Во время работы вращательные насосы с масляным уплотнением будут выпускать пары масла через выхлопной порт из-за высокой рабочей температуры. Это приводит к потерям масла, которые будут зависеть от количества газа или пара, попадающего в насос. Можно улавливать капельки масла в выхлопном трубопроводе с помощью установки сепараторов. Это значи-

тельно снизит потери масла. Фильтры масляного тумана, устанавливаемые в некоторых насосах, так же будут улавливать капельки масла, так что утечки масла не выйдут из насоса, а потери масла в насосе будут почти нулевыми, а отделенное масло будет возвращаться в насос. Для насосов без встроенных сепараторов фильтр масляного тумана по-прежнему является как дополнительная опция.

Если вращательный насос с масляным уплотнением работает без сепаратора масла и масловозвратного устройства, то возможно ожидать некоторое потребление масла, количество которого будет зависеть от размера насоса и характера работы. В худшем случае это количество может достигать около 2 см<sup>3</sup> на каждый кубометр откачиваемого воздуха (при STP и учитывая газобалласт). С помощью рис. 8.1 можно предположить количество утечек масла в конкретной ситуации. Пример показывает, что наибольшие потери масла можно ожидать при работе насоса с газобалластом. Эту ситуацию всегда следует учитывать в реальных условиях.



Пример: потери масла в насосе TRIVAC S16A при давлении 1 мбар:

- a) без газобалласта в соответствии с кривой скорости действия  $S=15 \text{ м}^3/\text{ч}$  потери масла будут  $0,33 \text{ см}^3/\text{ч}$  (линия a)
- b) с газобалластом:  $S=9 \text{ м}^3/\text{ч}$  при 1 мбар, потери  $0,018 \text{ см}^3/\text{ч}$  (линия b1) плюс дополнительные потери из-за газобалласта  $0,1$  раз от  $1,6 \text{ м}^3/\text{ч}$  - дополнительно  $3 \text{ см}^3/\text{ч}$ , т.е. общие потери масла  $=3,018 \text{ см}^3/\text{ч}$ .

*Рисунок 8.1. Потери масла в насосе с масляным уплотнением (относительно максимального худшего значения потерь  $2 \text{ см}^3/\text{ч}$  на  $1 \text{ м}^3$  откачиваемого газа)*

Если масло насоса становится непригодным для использования из-за попадания паров и загрязнений, которые образуются в процессе, то масло придется заменить. Невозможно сформулировать непреложные правила для определения периода замены масла, т.к. характер работы будет определять длитель-



ность годности масла. В некоторых условиях (форвакуумные насосы для диффузионных насосов в электро-ядерных ускорителях) вращательные насосы могут работать годами без замены масла. В очень «грязных» условиях (например, во время импрегнирование/пропитка) масло возможно придется менять ежедневно. Масло придется менять тогда, когда его начальный светло коричневый цвет изменится на темно коричневый в результате попадания жидкости (воды) в насос. Замену масла необходимо проводить тогда, когда в масле образуются хлопья в результате коррозии, означаящем, что в выхлопе присутствует коррозионные агенты.

#### **Замена масла**

Замену масла следует всегда проводить при выключенном насосе, но при рабочей температуре. В каждом насосе есть отверстия для слива (заливки) масла. Если насос сильно загрязнен, его следует очистить. Следует соблюдать соответствующие рабочие инструкции.

#### **8.3.1.2 Выбор масла насоса при работе с агрессивными парами**

Если откачиваются коррозионные пары (т.е. пары кислот) тогда следует использовать масло для защиты от коррозии PROTELEN® вместо обычного масла для насосов (N62). Пары этих типов будут реагировать с агентами (щелочами) в масле, защищающими от коррозии. При непрерывных реакциях нейтрализации будет происходить выброс защитных агентов в зависимости от количества и кислотности паров. В зависимости от этого масло придется менять более часто. Защищающие от коррозии масла очень гигроскопичны и легко образуют соединения с водой (эмульсии). Соответственно насосы, которые заполнены таким маслом, будут адсорбировать влагу из воздуха, если насос не будет работать в течение длительного времени. Не следует без необходимости использовать масло для защиты от коррозии при откачке паров воды, т.к. смазочным и защитным свойствам масла будет нанесен ущерб. Т.к. масло будет адсорбировать воду, то оно больше не сможет работать на обеспечение предельного давления, которое возможно при работе со свежим защитным маслом или стандартным маслом насоса (N62). В обычных условиях в насосы с масляным уплотнением не следует заливать масло для защиты от коррозии. Масло N62 прекрасно подходит при откачке воздуха, паров воды, не коррозионных паров органических соединений и может защитить насос от конденсации паров внутри насоса.

#### **8.3.1.3 Измерения при откачке различных химических веществ**

Этот раздел не может охватить различные области использования вакуумных насосов с масляным уплотнением в химической промышленности. Многолетний опыт работы LEYBOLD с наиболее сложными химическими технологическими процессами может помочь в решении конкретных проблем. Эти аспекты приведены кратко: откачка взрывоопасных газовых смесей, конденсируемых паров, коррозионных газов и паров.

#### **Защита от взрывов**

При планировании и проектировании вакуумных систем должны соблюдаться требования по технике безопасности и защите окружающей среды. Оператор должен быть знаком с откачиваемыми веществами и методами работы с ними и должен учитывать не только нормальный режим работы, но и внештатные ситуации, когда обычные рабочие параметры не соблюдаются. Самым важным в предотвращении образования взрывоопасных смесей является – в дополнение к добавлению защитных инертных газов – поддержание значений пределов взрывоопасной концентрации с помощью конденсаторов, адсорбционных ловушек, газовых скрубберов.

#### **Защита от конденсации паров**

Для защиты от конденсации в насосах производства LEYBOLD предусмотрены три опции:

\* принцип газобалласта (рис. 2.14) – значительно увеличивает количество допустимых паров.

\* повышение температуры насоса. Надежная конструкция насосов позволяет работать им при температуре до 120°C. Таким образом количество допустимых паров для воды увеличивается в пять раз по сравнению с обычным газобалластом.

\* использование вакуумных конденсаторов (раздел 2.1.5). Они работают как насосы и должны подбираться по размеру так, чтобы стоящие за ними газобалластные насосы не получали паров больше, чем допустимо.

#### **Защита от коррозии**

Насосы с масляным уплотнением и так уже достаточно защищены от коррозии масляной пленкой, присутствующей на всех поверхностях компонентов. Под коррозией в данном случае понимается электрохимическое разложение металлов, т.е. выход электронов из атома металла и их взаимодействие с окислителями (коррозионными газами). Атом металла, который чувствителен к коррозии, должен связаться с активным атомом окислителя.



Это объясняет, почему насосы с масляным уплотнением защищены от коррозии: концентрация окислителей в масле пренебрежимо мала, поэтому возможность выхода электронов из металлов так же мала. Использование так называемой нержавеющей стали не имеет смысла, т.к. необходимо окисление для пассивации этих сталей (для достижения пассивной области для компонентов этих сталей). Плотность тока критической пассивации обычно не влияет в насосах с масляным уплотнением.

#### **а) кислоты**

Насосы LEYBOLD обычно подходят для откачки кислот. В особых случаях возможны проблемы с маслом и дополнительным оборудованием, установленным на входе или выходе насоса. Обратитесь в LEYBOLD для решения этих задач.

#### **б) ангидриды**

Угарный газ (CO) является сильным восстановителем. Поэтому при откачке CO важно, чтобы не воздух использовался в качестве газобалласта, а инертные газы (аргон, азот). Инертные газы в качестве газобалласта следует использовать при откачке SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S. При откачке этих ангидридов следует использовать масла, замедляющие коррозию. углекислый газ CO<sub>2</sub> можно откачивать без особых проблем.

#### **с) растворы щелочей**

Обычно при откачке растворов щелочей (оснований). Растворы каустической соды и едкого калия не следует откачивать в концентрированном виде. Аммиак поддается откачке при закрытом клапане газобалласта. Органические щелочные среды, такие как метиламин и диметиламин можно хорошо откачивать с открытым клапаном газобалласта.

#### **д) газообразные элементы (одноосставные газы)**

Откачка азота и инертных газов не требует особых мер.

При откачке **водорода** необходимо принять меры чтобы не допустить опасности образования взрывоопасных смесей. Клапан газобалласта не следует открывать при откачке водорода. Двигатель насоса должен быть во взрывобезопасном исполнении.

**Кислород: следует принять особые меры предосторожности при откачке кислорода!** Необходимо использовать масла для насосов со специальной формулой. Обратитесь за консультацией в LEYBOLD.

#### **е) алканы, парафины**

алканы с низкими молекулярными весами, такие как метан или бутан, можно откачивать с закрытым клапаном газобалласта или с использованием инертного газа в качестве газобалласта и/или повысив температуру насоса. Но при этом повышается взрывоопасность!

#### **ф) спирты (алкоголь)**

при достижении рабочей температуры насоса можно откачивать метанол и этанол без газобалласта (с маслом насоса N62). Для откачки спиртов с высокими весами молекул, такими как бутанол, следует открыть газобалласт или принять другие меры для предотвращения конденсации

#### **г) растворители**

**Ацетон:** можно откачивать без проблем при достижении рабочей температуры.

**Бензол:** меры предосторожности – пары очень пожароопасны. Предельное давление снижается путем разбавления масла насоса. смесь воздуха и бензола взрыво- и пожароопасна. Работать без газобалласта! В качестве газобалласта можно использовать только инертные газы.

#### **Четыреххлористый углерод и трихлорэтилен:**

откачка допускается, не огнеопасны и не взрывоопасны, но будут растворяться в масле и таким образом повышать предельное давление. Дайте насосу прогреться до рабочей температуры. При откачке четыреххлористого углерода и других не огнеопасных растворителей держите газобалласт открытым. Используйте масло насоса N62.

**Толуол:** откачивайте через низкотемпературный экран и без газобалласта, или используйте инертный газ в качестве газобалласта.

### **8.3.1.4 Дефекты в работе при откачке с газобалластом - потенциальные источники ошибок, когда не достигается требуемое предельное давление**

а) масло насоса загрязнено (особенно растворенными парами). Проверьте цвет и свойства масла. Способ устранения: дайте насосу поработать с открытым газобалластом и, изолировав вакуумную камеру, в течение достаточно длительного времени. При сильном загрязнении масло желательно заменить. Не следует оставлять насос на длительное время с загрязненным маслом.

б) движущиеся части насоса изношены или повреждены. При соблюдении чистоты насо-



сы LEYBOLD могут работать в течение многих лет без особых технических затрат. Если насос работал с течением длительного времени с грязным маслом, то подшипники и затворы могут иметь механические повреждения. Об этом необходимо помнить, если насос, даже при замене масла, больше не достигает предельного давления, указанного в каталоге. В этом случае насос следует отослать для ремонта. Обратитесь в отдел обслуживания LEYBOLD.

с) неисправны средства измерения (раздел 8.4.2).

#### **Потенциальные источники опасности (насос не работает):**

- \* Проверьте подачу электропитания.
- \* Насос был оставлен с загрязненным маслом, вязкость которого изменилась.
- \* Температура насоса менее 10°C, масло затвердело. прогрейте насос.
- \* Есть механические повреждения. Обратитесь в отдел обслуживания.

#### **Течи масла на валах**

Если масло появилось на валу, то придется проверить манжеты (пружинные кольца) на вращающемся валу и по возможности заменить. Конструкция насоса позволяет сделать это легко – прочтите руководство по эксплуатации насоса.

### **8.3.2 Насосы Рутса**

#### **8.3.2.1 Общие рекомендации по установке, работе**

Насосы Рутса должны быть точно выровнены. При установке насоса необходимо убедиться, что на насос нигде не действуют напряжения, и нет перекосов. Следует избегать любых напряжений в корпусе насоса из-за подключения трубопроводов. Любые напряжения, которые будут воздействовать на насос, опасны, т.к. зазоры внутри насоса очень малы.

Насосы Рутса подключаются к линиям подачи питания через клеммную коробку двигателя. Необходимо, чтобы защитный переключатель двигателя (от перегрузок /перегрева) соответствовал региональным требованиям.

Перед установкой насоса необходимо проверить направление вращения двигателя с открытыми входным и выходным портами насоса. Ведущий вал, если смотреть со стороны двигателя, должен вращаться по часовой стрелке. Обратите внимание на стрелку на двигателе, указывающую направление вращения! Если насос вращается в неправиль-

ном направлении, то поменяйте местами две фазы в кабеле подключения двигателя.

Насосы Рутса можно включать только после того, как форвакуумный насос откачает вакуумную камеру до давления включения.

Допустимое давление включения  $p_E$  будет зависеть от соотношения снижения насоса Рутса относительно форвакуумного насоса, вычисляемого как соотношение допустимого перепада давления  $\Delta p_{\max}$  через коэффициент компрессии, уменьшенный на единицу:

$$p_E = \frac{\Delta p_{\max}}{k_{th} - 1}$$

Где  $k_{th}$  – это отношение теоретической скорости действия насоса Рутса к номинальной скорости действия форвакуумного насоса.

Если насос защищен переключателем давления диафрагменного типа, тогда насос будет включаться автоматически. Если комбинация насоса Рутса и форвакуумного насоса работают с очень летучими веществами, например, жидкостями в нижней точке кипения, тогда желательно использовать насос Рутса, который оборудован встроенным байпасным трубопроводом и клапаном, который срабатывает на установленном заранее давлении. Например, вакуумный насос RUVAC WAU/WSU.

Насос из серии RUVAC WAU/WSU, оборудованный встроенным байпасным трубопроводом, может включаться одновременно с форвакуумным насосом. Байпасный трубопровод защитит насос Рутса от перегрузки.

#### **8.3.2.2 Замена масла, техническое обслуживание**

В чистых рабочих условиях масло в насосе Рутса будет стариться только в результате естественного износа в подшипниках и редукторе (механизме привода). Тем не менее, рекомендуется проводить первую замену масла после 500 часов работы, чтобы удалить все металлические частички, которые могли образоваться во время подготовки к работе. Потом достаточно менять масло каждые 3000 часов работы. Когда откачиваемые газы содержат пыль или другие загрязнения, необходимо менять масло более часто. Если насос работает при высоких температурах окружающей среды, то масло в уплотняющих камерах следует менять при каждой замене масла.



Рекомендуется использовать специальное масло N62.

В грязных рабочих условиях частички пыли могут образовывать осадок в откачивающей камере насоса. Эти частички могут оседать на части камеры и роторов насоса. Загрязнения можно удалить, отсоединив оба трубопровода и продув насос сухим сжатым воздухом или промыв в подходящим мощном растворе (бензин, керосин).

Масло в насосе Рутса придется заменить. При очистке можно проворачивать ротор вручную, т.к. высокие скорости при работе двигателя могут повредить насос, т.к. из-за загрязнений поверхности.

Глубоко въевшуюся грязь, которую нельзя смыть, можно удалить механически с помощью кор-щетки или скребков.

#### **ВАЖНО!**

Частички загрязнений не должны оставаться в камерах насоса. После промывки проверьте работоспособность насоса, медленно проворачив роторы руками. Затрудненного вращения не должно быть. Обычно нет необходимости разбирать насос Рутса. Если это требуется из-за сильного загрязнения, желательно обратиться к производителю насоса.

#### **8.3.2.3 Действия в случае неисправности**

1. **насос перегревается** (максимальная рабочая температура 100...115°C).

Возможные причины:

**Перегрузка:** превышение выхода тепла при сжатии из-за слишком большого коэффициента компрессии. Проверьте настройки давления и герметичность вакуумной камеры.

**Некорректные зазоры:** расстояние между роторами и корпусом уменьшилось из-за загрязнения и механического напряжения.

**Загрязнение подшипников:** сильное трение в подшипниках.

**Некорректный уровень масла:** если уровень масла слишком высок, шестерни касаются масла, что приводит к сопротивлению трению, если уровень низкий, то система остается без смазки.

**Некорректный тип масла:** для насоса необходимо использовать масло класса SAE30.

2. **повышенное потребление мощности:** все факторы, которые могут приводить к повышению температуры могут приводить и к повышению потребляемой мощности. Двигатель может повредиться, если требование

повышения мощности не сопровождается повышением температуры насоса.

#### **3. масло в камере насоса**

Возможные причины:

**Уровень масла слишком высок:** масло приводит к увеличению тепловой нагрузки. Пузырьки масла выходят наружу.

**Смесь масла с веществами:** азеотропная дегазификация масла.

**Течи в насосе:** доступ воздуха через сливное и маслосливное отверстия насоса вызывает большой поток воздуха и попадание масла в камеры насоса.

#### **4. аномальные шумы во время работы.**

Возможные причины:

- \* наличие грязи на роторах,
- \* повреждение подшипников или редуктора,
- \* касание роторами корпуса.

Если повреждены подшипники или редуктор, или роторы касаются корпуса, то ремонт насоса должен выполняться только его производителем.

### **8.3.3 Турбомолекулярные насосы**

#### **8.3.3.1 Общие рекомендации по работе**

Несмотря на относительно большой зазор между ротором насоса и статором, турбомолекулярные насосы следует защитить от попадания инородных частиц через входной порт. По этой причине никогда не следует работать с насосом со снятым входным фильтром. Также следует избегать резких ударов по насосу и изменения его положения, когда он работает.

Кроме того, особенно для больших насосов с длинными роторными пластинами, напуск воздуха в насос до атмосферного давления, когда роторы вращаются, может выполняться только при точном соблюдении инструкций, приведенных в руководстве по эксплуатации. В некоторых случаях возможна работа с турбомолекулярными насосами в особых условиях.

Турбомолекулярный насос, например, может использоваться незащищенным внутри магнитного поля, если магнитная индукция на поверхности корпуса насоса не превышает  $B = 3 \cdot 10^{-3} T$  по радиальному направлению и  $B = 15 \cdot 10^{-3} T$  по осевому столкновению.



В радиоактивной среде стандартные турбомолекулярные насосы могут безопасно использоваться при уровне доз в диапазоне  $10^4 \dots 10^5$  рад. При более высоком уровне радиации некоторые материалы внутри насоса могут модифицироваться. В таких случаях вне радиоактивной зоны устанавливаются электронные преобразователи частоты, т.к. полупроводники внутри них могут выдерживать радиацию только до  $10^3$  рад. Другой возможностью является использование преобразователей частоты с двигателем, которые могут выдерживать до  $10^8$  рад.

Для работы турбомолекулярного насоса необходим форвакуумный насос. В зависимости от размера откачиваемой камеры форвакуумный и турбомолекулярный насосы могут включаться одновременно. Если время, требуемое форвакуумному насосу для создания в камере давления около 1 мбар, больше времени запуска турбомолекулярного насоса (см. руководства по эксплуатации), тогда желательно установить задержку включения турбомолекулярного насоса. Желательно предусмотреть байпасные трубопроводы в системах, работающих в циклах, чтобы сохранить время схватывания (запуска) турбомолекулярного насоса. При давлении около  $10^{-1}$  мбар открытие высоковакуумного клапана не опасно.

### 8.3.3.2 Техническое обслуживание

Турбомолекулярные насосы и преобразователи частоты почти не требуют технического обслуживания. В случае насосов с масляной смазкой необходимо заменять смазку в подшипниках с определенным интервалом (1500...2500 часов работы в зависимости от типа). Для насосов со смазкой это не требуется (смазка на весь срок эксплуатации). Если необходимо очистить блок турбин насоса, то пользователь может это легко сделать сам, изучив руководство по эксплуатации

## 8.3.4 Диффузионные и пароструйные насосы

### 8.3.4.1 Замена рабочей жидкости и очистка насоса

Необходимо всегда менять рабочую жидкость в насосе, если он не достигает предельного давления или если быстрота действия падает. Ресурс рабочей жидкости, как правило, составляет от нескольких недель до месяцев или даже лет в зависимости от условий работы насоса. Он снижается при частой эксплуатации при высоком давлении за счет попадания агрессивных паров и воздуха

(это не применимо для силиконовых масел и ртути).

В случае диффузионных и пароструйных насосов опасность представляет рабочая жидкость тогда, когда поток воздуха в горячий насос слишком высок. Когда поток воздуха (с атмосферного давления) случайно на короткий период сталкивается с силиконовым маслом, масло не будет испорчено полностью, и рабочая жидкость DIFFELEN будет чуть затронута. Продукты со значительно более высокими давлениями паров, которые могут образовываться в ходе окисления удаляются за более короткий период за счет фракционирования и дегазации оборудования в насосе (раздел 2.1.6.1). Даже если цвет рабочей жидкости изменился со светло-коричневой на темно-коричневый за счет попадания воздуха, это не означает, что среда стала непригодной. С другой стороны, если жидкость стала мутной и вязкой, что может произойти за несколько минут контакта с воздухом, то такую среду необходимо заменить. В некоторых случаях возможно попадание продуктов разложения рабочей жидкости в масло форвакуумного насоса, так что придется менять масло и в форвакуумном насосе.

Парортутные и пароструйные насосы менее чувствительны к контакту с воздухом, чем паромасляные. Окисление горячей ртути при попадании воздуха очень незначительно по сравнению с потерями ртути в форвакуумном трубопроводе.

**Замена рабочей жидкости:** необходимо вынуть внутреннюю секцию из насоса и вылить загрязненную рабочую жидкость. Внутренние компоненты и корпус насоса следует промыть чистым бензином или керосином. Внутренние секции и корпус парортутного насоса следует предварительно очистить щеткой, а для очистки сопел следует использовать ершик. Проверьте, что все отверстия в соплах прочищены. Желательно выпарить все остатки чистящего раствора. Затем установите внутреннюю секцию и залейте жидкость в чистый насос через форвакуумный порт. Необходимо, чтобы крышка верхнего сопла не смачивалась рабочей жидкостью! Не наливайте много рабочей жидкости!

### 8.3.4.2 Ошибки при работе с диффузионными и пароструйными насосами

**Потенциальные источники неисправностей в случае, если предельное давление не достигается:**



\* температура охладителя слишком высока, недостаточный поток воды. Поток охлаждающей воды следует всегда контролировать через потокоммер чтобы защитить насос от повреждения. Способ устранения: температура выходящей воды не должна превышать 30°C, а при ее повышении увеличивается расход. В трубопроводах подачи воды не должно быть отложений накипи.

\* высокое выпускное (форвакуумное давление): это особенно возможно там, где откачиваемые из камеры пары или продукты разложения из движущей среды (потока воздуха) попадают в форвакуумный насос. Проверьте давление форвакуумного насоса без диффузионного. Способ устранения: дайте форвакуумному насосу поработать с газобалластом в течение некоторого времени. Если это не помогло, замените в насосе масло.

\* рабочая жидкость непригодна или есть ее расход: замените движущую среду.

\* некорректный нагрев: проверьте выход нагревателя и наличие хорошего теплового контакта между нагревательной пластиной и низом секции кипячения. Если надо, замените нагреватель.

\* течи или загрязнения: если насос загрязнен парами, пропускайте воздух через натекатель в течение длительного времени через систему. При использовании DIFFELEN давление в камере не должно превышать  $10^{-2}$  мбар.

\* система измерения устарела или неисправна (раздел 8.4.2).

#### **Потенциальные источники неисправностей в случае, если быстроты действия не достаточно:**

\* выпускное давление слишком высокое: проверьте форвакуум, дайте насосу с газобалластом поработать в течение длительного времени. Возможно, нужно заменить масло в насосе.

\* рабочая жидкость диффузионного насоса непригодна: замените движущую среду.

\* сопла диффузионного насоса засорены: очистите насос.

\* слабый нагрев: проверьте выход нагревателя и наличие хорошего теплового контакта между нагревательной пластиной и низом секции кипячения.

\* вещества, присутствующие в вакуумной камере, имеют давление паров, которое выше давления, создаваемого парами рабочей жидкости: например, ртуть, которая особенно опасна, т.к. ее пары образуют амальгамы в масле насоса, что делает невозможным достижение предельного давления.

## **8.3.5 Адсорбционные насосы**

### **8.3.5.1 Снижение адсорбционной емкости**

Значительное снижение быстроты действия и невозможность достижения предельного давления, обычно достижимого после проведения тепловой регенерации, означает, что используемые цеолиты загрязнены. Попытки обновить их в ходе специальной регенерации результата не дадут. Их следует просто заменить.

### **8.3.5.2 Замена молекулярной решетки**

Перед установкой новых цеолитов насос необходимо хорошо промыть. Перед установкой адсорбционного насоса с новыми цеолитами его необходимо прогреть под вакуумом с помощью нагревателей самого насоса, чтобы удалить возможные загрязнения.

## **8.3.6 Титановые сублимационные насосы**

Каждая из ступеней титанового сублимационного насоса содержит около 1,2 г полезного источника титана. При нагреве током 50 А температура поверхности достигает почти 1850 К, скорость сублимации примерно 0,12 г/ч, т.е. ступень может работать примерно 10 часов. Т.к. при давлении ниже  $1 \cdot 10^{-6}$  мбар сублимация не продолжается (она существует только при давлении ниже  $5 \cdot 10^{-8}$  мбар) при низком объеме газа – уже есть действующий период сублимации более чем в 10 раз, то при рабочем давлении  $10^{-10}$  мбар на ступень можно предположить период откачки почти один месяц.

Эффективная быстрота действия такого насоса будет зависеть от поверхности экрана геттера и геометрии отверстия всасывания. быстрота действия, отнесенная к площади поверхности геттера, будет зависеть от рода газа и температуры экрана геттера. Т.к. инертные газы, например, не могут откачиваться совсем, то титановые сублимационные насосы следует использовать только со вспомогательными насосами (магниторазрядный, турбомолекулярный) для откачки этих газов. Вспомогательные насосы могут быть меньше сублимационного насоса. Работа без дополнительных насосов применима только в некоторых случаях.

Выбор хладагентов определяется рабочими условиями и требованиями к предельному давлению. При высоких давлениях, выше  $1 \cdot 10^{-6}$  мбар, больше тепловой энергии будет прикладываться к экрану геттера через цикл сублимации. По этой причине желательно использовать жидкий азот. При низких дав-



лениях достаточно будет потока охлаждающей воды. Экран геттера следует при возможности нагревать при комнатной температуре перед напуском воздуха в насос, т.к. влага из воздуха будет конденсироваться на поверхности.

### 8.3.7 Магниторазрядные насосы

Магниторазрядные насосы используют ток высокого напряжения. Установку и подключение необходимо выполнять под надзором квалифицированных специалистов. Следуйте инструкциям в руководстве по эксплуатации!

Ресурс насоса линейно зависит от рабочего давления насоса. Для магниторазрядных насосов LEYBOLD справедливо выражение:

$$p \cdot T = 45 \cdot 10^{-3} \text{ мбар} \cdot \text{ч}$$

( $p$  = рабочее давление,  $T$  = ресурс).

Это означает, что при давлении  $10^{-3}$  мбар ресурс составит 45 часов, при давлении  $10^{-6}$  мбар ресурс 45 000 часов, при  $10^{-9}$  мбар ресурс 45 000 000 часов.

Если триодный насос не понадобится в течение длительного времени, он может непрерывно работать при низком давлении без влияния на ресурс, или его можно напустить в него воздух и поместить в пылезащитный пакет. Свойства запуска магниторазрядных (триодных) насосов производства LEYBOLD очень хороши, поэтому не возникает проблем при их запуске после длительного хранения.

При установке магниторазрядных насосов необходимо гарантировать, что магнитные поля не будут влиять на работу других устройств (ионизационных вакуумметров, приборов измерения парциального давления и т.ч.). Установочные устройства для магниторазрядных насосов не могут замыкать контур индукции потока и, следовательно, ослаблять контур индукции воздуха и быстроты действия.

Если предельное давление, которое можно получить, недостаточно даже при хорошей герметизации камеры, то достаточно прогреть присоединенное оборудование при температуре 200...250°C. Если давление повысится до  $10^{-5}$  мбар по выполнению, то насос станет таким горячим после откачки газов в течение 2 часов, что его не надо будет дополнительно прогревать. Можно нагреть насос тем, что подать воздух в течение 2 часов при  $10^{-5}$  мбар перед прогревом других компонентов системы. Если предельное давление

остается неудовлетворительным, тогда надо прогреть сам насос в течение нескольких часов при 250...300°C (но не выше 350°C). Насос не должен работать во время прогрева. Если давление поднимается выше  $5 \cdot 10^{-5}$  мбар, нужно или еще прогревать насос или установить дополнительный насос. Перед напуском воздуха насос должен остыть как минимум до 150°C

## 8.4 Рекомендации по работе с вакуумметрами

### 8.4.1 Рекомендации по установке сенсоров

Здесь важны и внешняя ситуация в непосредственной близости от вакуумной системы и рабочие условия внутри системы (давление, состав газов). Вначале необходимо выяснить, будет ли место установки системы измерения чувствительным из-за физического расположения. Сенсоры (преобразователи) должны не только быть установлены вертикально над вакуумным фланцем, чтобы удерживать конденсат, частички металла от попадания в сенсор или даже маленькие частицы, такие как тонкие винты и другие от попадания в область действия системы измерения. Горячие катоды могут изгибаться и деформироваться и приводить к электрическим замыканиям внутри системы измерения. Поэтому можно сформулировать основное правило: **сенсоры должны устанавливаться вертикально с открытым нижним концом**. Так же важно устанавливать систему измерения в местах, где нет вибраций.

Помимо вышеперечисленного необходимо учитывать внешнюю температуру, тепловое излучение от печей или других поверхностей, которые приводят к тому, что окружающая температура становится выше допустимых значений. Превышение температуры окружающей среды приводит к некорректным показаниям давления для теплопроводных вакуумметров.

### 8.4.2 Загрязнения в системе измерения и их устранение

Вакуумметры, используемые в вакуумной технологии, работают в «грязных» условиях. Это вполне понятно, т.к. вакуумные устройства или системы не используются только для создания низкого давления, а используются в технологических процессах химической, металлургической отраслей промышленности, ядерной физике при низких давлениях. Здесь, в зависимости от природы процесса,



будет высвободиться большое количество газов и паров постоянно или периодически. Они могут входить в систему измерения, обеспечивая измерения давления и установленные в вакуумной системе и – из-за поверхностных реакций или простого нанесения – могут значительно фальсифицировать измерения давления. Это справедливо для всех типов вакуумметров, особенно для высокочувствительных, высокоточных систем измерения. Можно попытаться защитить системы измерения от загрязнения путем установки подходящих экранов. Однако это часто приводит к тому, что показания, регистрируемые системами измерения, значительно отклоняются от действующего давления в системе.

В принципе невозможно предохранить вакуумметры системы измерения от загрязнения. Т.е. необходимо гарантировать, что:

- \* влияние загрязнений на показания давления минимальны,
  - \* систему измерения можно быстро очистить.
- Для большинства вакуумметров удовлетворить этим двум условиям не просто.

Загрязнения в компрессионных вакуумметрах приведет к некорректной и неуправляемой индикации давления. Грязные сенсоры THERMOVAC будут показывать слишком высокое давление в нижнем диапазоне измерений, т.к. поверхность горячего электрода будет изменена. В загрязненных вакуумметрах Пеннинга показания давления будут ниже, т.к. ток разряда будет меньше. В случае ионизационных вакуумметров с горячим катодом, электроды и стенки будут загрязнены, что при определенных условиях приведет к снижению диэлектрического напряжения. Однако здесь системы измерения подвергаются прогреву и дегазации за счет прохождения тока или электронной бомбардировки. Поэтому ионизационные вакуумметры часто используются в сверхвысоком вакууме, где необходимо гарантировать чистые условия работы.

### 8.4.3 Влияние магнитных и электрических полей

Во всех системах измерения, где для измерения используется принцип ионизации молекул газа (ионизационные вакуумметры с горячим и холодным катодом) утечки магнитного поля или электрических потенциалов могут иметь основное влияние на показания

давления. При низких давлениях это так же возможно для потенциалов стенок, отклоняющих ионы от потенциала катода и влияющих на ток ионной ловушки.

В системах измерения, используемых в высоком и сверхвысоком вакууме, необходимо гарантировать, что требуемые высокие значения изоляции для электродов высокого напряжения и ионных ловушек могут так же поддерживаться во время работы и иногда во время прогрева. Дефекты изоляции в ловушке (детекторе) могут случаться во внешних линиях поля и внутри самой системы измерения. Недостаточность изоляции в ловушке (детекторе) может привести к сползанию токов – при низком давлении – для стимулирования показания в диапазоне высокого давления. Очень низкие токи в ионной ловушке требуют хорошей изоляции. Внутри измерительных сенсоров сползание токов тоже может происходить если ловушка недостаточно экранирована от других электродов.

Ошибки частоты при подключении преобразователей к вакуумной системе являются результатом использования длинных и узких трубопроводов и разъемов. Значения проводимости должны быть во всех случаях максимально большими. Наиболее приемлемым решением является использование интегрированной системы измерений. Когда же линии соединений низких проводимостей используются для индикации давлений, то в зависимости от чистоты преобразователей и соединений показания могут быть низкими или высокими. Здесь возможно наличие нескольких ошибок измерения! Когда системы измерений могут прогреваться, необходимо гарантировать, что соединения и разъемы могут так же нагреваться.

### 8.4.4 Соединения (разъемы), блоки питания, системы измерений

Кабели измерения (кабели соединения между преобразователем и блоком управления вакуумметром) обычно имеют длину 2 м. Если необходимо использовать более длинный кабель – для установки в панель управления, например – необходимо проверить ситуацию чтобы определить, могут ли показания давления быть некорректными. Информацию о длинных кабелях можно получить в отделе технической консультации.





## 9 Таблицы, формулы, номограммы, диаграммы и символы

Единицы 1) измерения	$\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$ , Па <sup>2)</sup>	мбар	Бар	Торр
$1 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2} = 1 \text{ Па}$	1	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$7.5 \cdot 10^{-3}$
1 мбар	100	1	$1 \cdot 10^{-3}$	0.75
1 бар	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$	1	750
1 торр <sup>3)</sup>	133	1.33	$1.33 \cdot 10^{-3}$	1

1) торр включен в табл. только для возможности преобразования единиц давления  $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$ , мбар, бар, торр, мм.вод.ст., мм.рт.ст., % вакуума, техн. атм, абс. атм., хотя сейчас почти не используется. Таблица сделана согласно стандарту DIN 1314.  
2) единица измерения Н Ньютон поделенная на квадратный метр ( $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$ ) так же обозначается как Па Паскаль:  $1 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2} = 1 \text{ Па}$ .  $\text{Н} / \text{м}^2$  или Па является единицей измерения давления жидкости в системе СИ.  
3) 1 торр = 4/3 мбар; 1 торр = 1 мбар.

Табл. 1: Допустимые единицы измерения давления и их взаимосвязь

$1 \downarrow = \dots \rightarrow$	мбар	Па Pa ( $\text{Н} / \text{м}^2$ )	дин·см <sup>-2</sup> (мкбар)	Атм	торр мм.рт.ст	Дюйм рт. См.	Микрон	См. Вод. ст.	кгс·см <sup>-2</sup>	Фунт·дюйм <sup>-2</sup> (psi)	фунт·фут <sup>-2</sup>
Мбар	1	$10^2$	$10^3$	$9.87 \cdot 10^{-4}$	0.75	$2.953 \cdot 10^{-2}$	$7.5 \cdot 10^2$	1.02	$1.02 \cdot 10^{-3}$	$1.45 \cdot 10^{-2}$	2.089
Па	$10^{-2}$	1	10	$9.87 \cdot 10^{-6}$	$7.5 \cdot 10^{-3}$	$2.953 \cdot 10^{-4}$	7.5	$1.02 \cdot 10^{-2}$	$1.02 \cdot 10^{-5}$	$1.45 \cdot 10^{-4}$	$2.089 \cdot 10^{-2}$
Мкбар	$10^{-3}$	0.1	1	$9.87 \cdot 10^{-7}$	$7.5 \cdot 10^{-4}$	$2.953 \cdot 10^{-5}$	$7.5 \cdot 10^{-1}$	$1.02 \cdot 10^{-3}$	$1.02 \cdot 10^{-6}$	$1.45 \cdot 10^{-5}$	$2.089 \cdot 10^{-3}$
Атм	$10^{13}$	$1.01 \cdot 10^5$	$1.01 \cdot 10^6$	1	760	29.92	$7.6 \cdot 10^5$	$1.03 \cdot 10^3$	1.033	14.697	2116.4
Торр	1.33	$1.33 \cdot 10^2$	$1.33 \cdot 10^3$	$1.316 \cdot 10^{-3}$	1	$3.937 \cdot 10^{-2}$	$10^3$	1.3595	$1.36 \cdot 10^{-3}$	$1.934 \cdot 10^{-2}$	2.7847
Мм.рт.ст	33.86	$33.9 \cdot 10^2$	$33.9 \cdot 10^3$	$3.342 \cdot 10^{-2}$	25.4	1	$2.54 \cdot 10^4$	34.53	$3.453 \cdot 10^{-2}$	$0.4811 \cdot 5$	70.731
Мк	$1.33 \cdot 10^{-3}$	$1.33 \cdot 10^{-1}$	1.333	$1.316 \cdot 10^{-6}$	$10^{-3}$	$3.937 \cdot 10^{-5}$	1	$1.36 \cdot 10^{-3}$	$1.36 \cdot 10^{-6}$	$1.934 \cdot 10^{-5}$	$2.785 \cdot 10^{-3}$
См. H <sub>2</sub> O	0.9807	98.07	980.7	$9.678 \cdot 10^{-4}$	0.7356	$2.896 \cdot 10^{-2}$	$7.36 \cdot 10^2$	1	$10^{-3}$	$1.422 \cdot 10^{-2}$	2.0483
Атм	$9.81 \cdot 10^2$	$9.81 \cdot 10^4$	$9.81 \cdot 10^5$	0.968	$7.36 \cdot 10^2$	28.96	$7.36 \cdot 10^5$	$10^3$	1	14.22	2048.3
Psi	68.95	$68.95 \cdot 10^2$	$68.95 \cdot 10^3$	$6.804 \cdot 10^{-2}$	51.71	2.036	$51.71 \cdot 10^3$	70.31	$7.03 \cdot 10^{-2}$	1	$1.44 \cdot 10^2$
фунт·фут <sup>-2</sup>	0.4788	47.88	478.8	$4.725 \cdot 10^{-4}$	0.3591	$1.414 \cdot 10^{-2}$	359.1	0.488	$4.88 \cdot 10^{-4}$	$6.94 \cdot 10^{-3}$	1

Нормальные условия: 0 °C и уровень моря, т.е.  $p = 1013 \text{ мбар} = 760 \text{ мм.рт.ст.} = 760 \text{ торр} = 1 \text{ атм}$   
В рт.= дюймы рт.; 1 мторр =  $10^{-3}$  торр = 1 мк (мкм рт. Ст.)  
Фунты на квадрат. дюйм =  $\text{psia} = \text{psi}$  абс. Давл.)  
Фунты на квадрат. Фут =  $\text{kg/cm}^2 = \text{psi}$  1 = 1 мкбар = 1 бар; 1 бар = 0.1 мбар; 1 см. Вод. Ст.=  $\text{g/cm}^2$  при 4 °C) = 1 атм;  $100 - (\text{x мбар} / 10.13) = \text{y} \%$  вакуума

Табл.2: Взаимосвязь единиц измерения давления

Аббревиатура	Газ	$C^* = \lambda \cdot p$ [см·мбар]
H <sub>2</sub>	водород	$12.00 \cdot 10^{-3}$
He	гелий	$18.00 \cdot 10^{-3}$
Ne	неон	$12.30 \cdot 10^{-3}$
Ar	аргон	$6.40 \cdot 10^{-3}$
Kr	криптон	$4.80 \cdot 10^{-3}$
Xe	ксенон	$3.60 \cdot 10^{-3}$
Hg	ртуть	$3.05 \cdot 10^{-3}$
O <sub>2</sub>	кислород	$6.50 \cdot 10^{-3}$
N <sub>2</sub>	азот	$6.10 \cdot 10^{-3}$
HCl	соляная кислота	$4.35 \cdot 10^{-3}$
CO <sub>2</sub>	углекислый газ	$3.95 \cdot 10^{-3}$
H <sub>2</sub> O	пары воды	$3.95 \cdot 10^{-3}$
NH <sub>3</sub>	аммиак	$4.60 \cdot 10^{-3}$
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	этанол	$2.10 \cdot 10^{-3}$
Cl <sub>2</sub>	хлор	$3.05 \cdot 10^{-3}$
Air	воздух	$6.67 \cdot 10^{-3}$

Табл. 3: Длина свободного пути  
Значение  $c^*$  произведение длины свободного пути и давления для различных газов при 20 °C (рис. 9.1)



Переменные	Основные формулы	Упрощенная для расчета	Значение для воздуха при T=20°C
Наиболее вероятная скорость частиц $c_w$	$c_w = \sqrt{\frac{2 \cdot R \cdot T}{M}}$	$c_w = 1.29 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{T}{M}}$ , см/с	$c_w = 410$ м/с
средняя скорость частиц $\bar{c}$	$\bar{c} = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}}$	$\bar{c} = 1.46 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{T}{M}}$ см/с	=464 м/с
Среднеквадратичная скорость частиц $\bar{c}^2$	$\bar{c}^2 = \frac{3 \cdot R \cdot T}{M}$	$\bar{c}^2 = 2.49 \cdot 10^8 \frac{T}{M}$ см <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	=25,16 · 10 <sup>4</sup> см <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Давление газа p	$p = n \cdot k \cdot T$ $p = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m_T \cdot \bar{c}^2$ $p = \frac{1}{3} \cdot n \cdot \bar{c}^2$	$p = 13.80 \cdot 10^{-20} \cdot n \cdot T$ мбар	$p = 4.04 \cdot 10^{-17} \cdot n$ мбар, для всех газов
Количество частиц n	$n = p/kT$	$n = 7.25 \cdot 10^{18} \frac{p}{T}$ см <sup>-3</sup>	$p = 2.5 \cdot 10^{15} \cdot p$ см <sup>-3</sup> (для всех газов)
Количество соударений на площади $Z_A$	$Z_A = \frac{1}{4} \cdot n \cdot \bar{c}$ $Z_A = \sqrt{\frac{N_A}{2 \cdot \pi \cdot M \cdot k \cdot T}} \cdot p$	$Z_A = 2.63 \cdot 10^{22} \frac{p}{\sqrt{M \cdot T}}$ см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>	$Z_A = 2.85 \cdot 10^{20} \cdot p$ см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> Рис. 78.2
Количество соударений в объеме $Z_V$	$Z_V = \frac{1}{2} \cdot n \cdot \bar{c}$ $Z_A = \frac{1}{e} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot N_A}{\pi \cdot M \cdot k \cdot T}} \cdot p^2$	$Z_V = 5.27 \cdot 10^{22} \frac{p^2}{c^* \cdot \sqrt{M \cdot T}}$ см <sup>-3</sup> с <sup>-1</sup>	$Z_V = 8.6 \cdot 10^{22} \cdot p^2$ см <sup>-3</sup> с <sup>-1</sup> Рис. 78.2
Уравнение состояния идеального газа	$p \cdot V = v \cdot R \cdot T$	$p \cdot V = 83.14 \cdot v \cdot T$ мбар	$p \cdot V = 2.44 \cdot 10^4 v$ для всех газов
Поток относительно площади (массовый расход) $q_w$	$q_{n,A} = Z_A \cdot m_T \cdot \sqrt{\frac{M}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T}}$	$q_{m,A} = 4.377 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{M}{T}} \cdot p$ г/см <sup>2</sup> с	$q_{m,A} = 1.38 \cdot 10^{-2} \cdot p$ г/см <sup>2</sup> с
$c^* = \lambda \cdot p$	в см·мбар (табл.3)	$m_T$ Масса частиц, г	$p$ Давление, мбар
k	постоянная Больцмана мбар·л/К	$N_A$ Число Авогадро, 1/моль	$R$ Газовая постоянная мбар л/моль·К
$\lambda$	длина свободного пути, см	n Кол-во частиц 1/см <sup>3</sup>	T Температура, К
M	молярная масса, г/моль	v кол-во частиц в моле	V Объем, л

Табл. 4: Важные формулы из кинетической теории газов

Обозначение	Символ	Значение и единицы измерения	Примечания
Атомная единица массы	$m_u$	$1.6605 \cdot 10^{-27}$ кг	
Число Авогадро	$N_A$	$6.0225 \cdot 10^{23}$ 1/моль	Кол-во частиц в моле
Постоянная Больцмана	k	$1.3805 \cdot 10^{-23}$ Дж·К <sup>-1</sup> $13.805 \cdot 10^{-23}$ мбар·л/К	
Масса покоя электрона	$m_e$	$9.1091 \cdot 10^{-31}$ кг	
Элементарный заряд	e	$1.6021 \cdot 10^{-19}$ А · с	
Газовая постоянная	R	$8.314$ Дж · моль <sup>-1</sup> /К = $83.14$ мбар·л/моль·К	$R = N_A \cdot k$
объем 1 моля идеального газа	$V_0$	$22.414$ м <sup>3</sup> /кмоль	По DIN 1343 молярный объем при 0 °C и 1013 мбар
Ускорение свободного падения	$g_n$	$9.8066$ м · с <sup>-2</sup>	
Постоянная Планка	h	$6.6256 \cdot 10^{-34}$ Дж · с	
Постоянная Стефана-Больцмана	s	$5.669 \cdot 10^{-8}$ Вт/м <sup>2</sup> К <sup>4</sup>	Так же : единицы проводимости, постоянная излучения
Относительный заряд электрона	$-e/m_e$	$-1.7588 \cdot 10^{11}$ А · с /кг	
Скорость света в вакууме	c	$2.9979 \cdot 10^8$ м · с <sup>-1</sup>	
Относительная плотность газа	$\ln$	кг · м <sup>-3</sup>	Плотность при 0 °C и $p_n = 1013$ мбар
Атмосферное Давление	$p_n$	$101.325$ Па = $1013$ мбар	DIN 1343 (ч. 75)
Температура (комнатная)	$T_n$	$T_n = 273.15$ К, J = 0 °C	DIN 1343 (ч. 75)

Табл. 5: Важные значения

Единицы	л/с	м <sup>3</sup> /ч	см <sup>3</sup> /с	Фунт <sup>3</sup> /мин
1 л/с	1	3.6	1000	2.12
1 м <sup>3</sup> /ч	0.2778	1	277.8	0.589
1 см <sup>3</sup> /с	10-3	$3.6 \cdot 10^{-3}$	1	$2.1 \cdot 10^{-3}$
1 Фунт <sup>3</sup> /мин	0.4719	1.699	471.95	1

Табл.6: Соотношения единиц измерения быстроты действия (объемного расхода)



$1 \downarrow = \dots \rightarrow$	мбар·л/с	Кг/ч (20°C)	кг/ч (0°C)	см <sup>3</sup> /ч (NTP)	см <sup>3</sup> /с (NTP)	торр·л/с	г/а (рис12, 20 °С)	г/а (рис122 5 °С)	мк·фунт /мин	lusec	Па· л/с	л/мин
мбар·л/с	1	$4.28 \cdot 10^{-3}$	$4.59 \cdot 10^{-3}$	3554	0.987	0.75	$1.56 \cdot 10^5$	$1.54 \cdot 10^5$	1593	$7.52 \cdot 10^2$	100	$59.2 \cdot 10^{-3}$
Кг/ч (20°C)	234	1	1.073	$8.31 \cdot 10^5$	231	175	—	—	$37.2 \cdot 10^4$	$1.75 \cdot 10^5$	$23.4 \cdot 10^3$	13.86
Кг/ч (0°C)	218	0.932	1	$7.74 \cdot 10^5$	215	163	—	—	$34.6 \cdot 10^4$	$1.63 \cdot 10^5$	$21.8 \cdot 10^3$	12.91
см <sup>3</sup> /ч (NTP)	$2.81 \cdot 10^{-4}$	$1.20 \cdot 10^{-6}$	$1.29 \cdot 10^{-6}$	1	$2.78 \cdot 10^{-4}$	$2.11 \cdot 10^{-4}$	44	—	$44.7 \cdot 10^{-2}$	$2.11 \cdot 10^{-1}$	$2.81 \cdot 10^{-2}$	$1.66 \cdot 10^{-5}$
см <sup>3</sup> /с (NTP)	1.013	$4.33 \cdot 10^{-3}$	$4.65 \cdot 10^{-3}$	3600	1	0.760	$1.58 \cdot 10^5$	—	1611	760	101	$6 \cdot 10^{-2}$
торр·л/с	1.33	$5.70 \cdot 10^{-3}$	$6.12 \cdot 10^{-3}$	4727	1.32	1	$2.08 \cdot 10^5$	$2.05 \cdot 10^5$	2119	$1 \cdot 10^3$	133	$78.8 \cdot 10^{-3}$
г/а (рис12 20 °С)	$6.39 \cdot 10^{-6}$	—	—	$2.27 \cdot 10^{-2}$	$6.31 \cdot 10^{-6}$	$4.80 \cdot 10^{-6}$	1	—	$10.2 \cdot 10^{-3}$	$4.8 \cdot 10^{-3}$	$6.39 \cdot 10^{-4}$	$37.9 \cdot 10^{-8}$
г/а (рис12 25 °С)	$6.50 \cdot 10^{-6}$	—	—	—	—	$4.88 \cdot 10^{-6}$	—	1	$10.4 \cdot 10^{-3}$	$4.89 \cdot 10^{-3}$	$6.5 \cdot 10^{-4}$	$38.5 \cdot 10^{-8}$
мк·фунт /мин	$6.28 \cdot 10^{-4}$	$2.69 \cdot 10^{-6}$	$2.89 \cdot 10^{-6}$	2.24	$6.21 \cdot 10^{-4}$	$4.72 \cdot 10^{-4}$	98.16	96.58	1	0.472	$6.28 \cdot 10^{-2}$	$37.2 \cdot 10^{-5}$
lusec	$1.33 \cdot 10^{-3}$	$5.70 \cdot 10^{-6}$	$6.12 \cdot 10^{-6}$	4.737	$1.32 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	208	205	2.12	1	$13.3 \cdot 10^{-2}$	$78.8 \cdot 10^{-5}$
Па· л/с	$1 \cdot 10^{-2}$	$4.28 \cdot 10^{-5}$	$4.59 \cdot 10^{-5}$	35.54	$9.87 \cdot 10^{-3}$	$7.5 \cdot 10^{-3}$	$1.56 \cdot 10^3$	$1.54 \cdot 10^3$	15.93	7.50	1	$59.2 \cdot 10^{-5}$
л/мин	16.88	$72.15 \cdot 10^{-3}$	$77.45 \cdot 10^{-3}$	$60.08 \cdot 10^3$	16.67	12.69	$2.64 \cdot 10^6$	$2.60 \cdot 10^6$	$26.9 \cdot 10^3$	$12.7 \cdot 10^3$	$16.9 \cdot 10^2$	1

1 см<sup>3</sup> (NTP) = 1 см<sup>3</sup> при обычных условиях (T = 273.15 K; p = 1013.25 мбар)

NTP = обычные условия и давление (1 атм; 0°C) R = 83.14 мбар·л/моль·К

1 см<sup>3</sup> (NTP) /ч = 1 атм·см<sup>3</sup>/ч = 1 см<sup>3</sup>/ч = 1 std cch 1 sccm = 10<sup>-3</sup> л/м = 60 sccs

По системе СИ SI: 1 Па·м<sup>3</sup>/с = 10 мбар·л/с; R = 8.314 Па·м<sup>3</sup>/моль·К; M в кг/моль 1 см<sup>3</sup> (NTP) /с = 1 sccs = 60 см<sup>3</sup> (NTP) /мин = 60 std ccm = 60 см<sup>3</sup>/мин

1 lusec = 1 л·мк/с 1 мк = 1микрон = 10<sup>-3</sup> торр 1 lusec = 10<sup>-3</sup> торр·л/с Фреон F12 (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) M = 120.92 г/моль; воздух M = 28.96 г/моль

Табл. 7а: Соотношения единиц измерения производительности (а, b) Q<sub>pv</sub> и течей

$1 \downarrow = \dots \rightarrow$	mbar·l/s	cm <sup>3</sup> /s (**)	Torr·l/s	Pa·m <sup>3</sup> /s	g/a (*)	oz/yr (*)	lb/yr (*)	atm·ft <sup>3</sup> /min	μ·l/s	μ·ft <sup>3</sup> /h	μ·ft <sup>3</sup> /min
mbar·l/s	1	0.987	0.75	10 <sup>-1</sup>	$1.56 \cdot 10^5$	$5.5 \cdot 10^2$	$8.4 \cdot 10^2$	$2.10 \cdot 10^{-3}$	$7.52 \cdot 10^2$	$9.56 \cdot 10^4$	1593
cm <sup>3</sup> /s (**)	1.013	1	0.76	$1.01 \cdot 10^{-1}$	$1.58 \cdot 10^5$	$5.6 \cdot 10^2$	$8.44 \cdot 10^2$	$2.12 \cdot 10^{-3}$	760	$96.6 \cdot 10^3$	1614
Torr·l/s	1.33	1.32	1	$1.83 \cdot 10^{-1}$	$2.08 \cdot 10^5$	$7.3 \cdot 10^2$	$4.52 \cdot 10^2$	$2.79 \cdot 10^{-3}$	$10^3$	$1.27 \cdot 10^5$	2119
Pa·m <sup>3</sup> /s	10	9.9	7.5	1	$1.56 \cdot 10^6$	$5.51 \cdot 10^3$	$8.4 \cdot 10^3$	$2.09 \cdot 10^{-2}$	$7.5 \cdot 10^3$	$9.54 \cdot 10^5$	$15.9 \cdot 10^3$
g/a (*)	$6.39 \cdot 10^{-6}$	$6.81 \cdot 10^{-6}$	$4.80 \cdot 10^{-6}$	$6.41 \cdot 10^{-7}$	1	$3.5 \cdot 10^{-3}$	$2.17 \cdot 10^{-3}$	$1.34 \cdot 10^{-3}$	$4.8 \cdot 10^{-3}$	0.612	$10.2 \cdot 10^{-3}$
oz/yr (*)	$1.82 \cdot 10^{-4}$	$1.78 \cdot 10^{-4}$	$1.36 \cdot 10^{-4}$	$1.82 \cdot 10^{-5}$	28.33	1	$6.18 \cdot 10^{-2}$	$3.80 \cdot 10^{-2}$	0.136	17.94	0.288
lb/yr (*)	$2.94 \cdot 10^{-8}$	$2.88 \cdot 10^{-8}$	$2.17 \cdot 10^{-8}$	$2.94 \cdot 10^{-9}$	$4.57 \cdot 10^2$	16	1	$6.17 \cdot 10^{-5}$	2.18	280	4.88
atm·ft <sup>3</sup> /min	$4.77 \cdot 10^{-6}$	$4.72 \cdot 10^{-6}$	$3.58 \cdot 10^{-6}$	47.7	$7.46 \cdot 10^1$	$2.63 \cdot 10^3$	$1.82 \cdot 10^3$	1	$3.58 \cdot 10^4$	$4.55 \cdot 10^7$	$7.80 \cdot 10^6$
μ·l/s	$1.33 \cdot 10^{-3}$	$1.32 \cdot 10^{-3}$	$10^{-3}$	$1.33 \cdot 10^{-4}$	208	7.34	$4.52 \cdot 10^1$	$2.79 \cdot 10^{-3}$	1	127	2.12
μ·ft <sup>3</sup> /h	$1.05 \cdot 10^{-6}$	$1.04 \cdot 10^{-6}$	$7.97 \cdot 10^{-6}$	$1.05 \cdot 10^{-6}$	1.83	$5.77 \cdot 10^{-2}$	$3.57 \cdot 10^{-2}$	$2.20 \cdot 10^{-3}$	$7.86 \cdot 10^{-3}$	1	$1.67 \cdot 10^{-2}$
μ·ft <sup>3</sup> /min	$6.26 \cdot 10^{-4}$	$6.20 \cdot 10^{-4}$	$4.72 \cdot 10^{-4}$	$6.28 \cdot 10^{-5}$	99	3.45	$2.14 \cdot 10^{-1}$	$1.32 \cdot 10^{-3}$	0.472	60	1

1 μ·ft<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> = 1.04 · 10<sup>-5</sup> std c/сек 1 микрон фунт<sup>3</sup>/ч = 0.0079 мк л/с 1 kg = 2.2046 фунт

1 cm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> (NTP) = 1 atm·cm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> = 1 scc·s<sup>-1</sup> = 1 sccss 1 микрон л/с = 0.0013 std cc/c = 1 lusec

1 cubic foot (cfut. cf) = 28.3168 dm<sup>3</sup> 1 фунт = 16 унций (oz)

1 atm·ft<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup> = 1 cfm (NTP) 1 микрон фунт<sup>3</sup>/мин = 1 μ·ft<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup> = 1 μ·cuft·min<sup>-1</sup> = 1 μ·cfm

1 Pa·m<sup>3</sup>/s = 1 Pa·m<sup>3</sup>/s (anglo-am.) = 103 Pa·l/s 1 standard cc per second = 96.600 micron cubic feet per hour 1 lusec = 1 μ·l·c

1 μ·l·s<sup>-1</sup> = 127 μ·ft<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> = 0.0013 std cc per second = 1 lusec 1 std cc/sec = 760 μ·l·s<sup>-1</sup>

\*) F12 (20 °C) C.Cl<sub>2</sub>F<sub>2</sub> M = 120.92 ч/моль )

Табл. 7б: Соотношения единиц измерения производительности (а, b) Q<sub>pv</sub> и течей



	% веса	% объема	Парциальное давление, мбар
N <sub>2</sub>	75.51	78.1	792
O <sub>2</sub>	23.01	20.93	212
Ar	1.29	0.93	9.47
CO <sub>2</sub>	0.04	0.03	0.31
Ne	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$1.9 \cdot 10^{-2}$
He	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$5.3 \cdot 10^{-3}$
CH <sub>4</sub>	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Kr	$3 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
N <sub>2</sub> O	$6 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
H <sub>2</sub>	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Xe	$4 \cdot 10^{-5}$	$8.7 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-5}$
O <sub>3</sub>	$9 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-5}$
	Σ 100 %	Σ 100 %	Σ 1013
50 % отн. влажности при 20 °С	1.6	1.15	11.7

Обратите внимание: в воздухе относительная влажность в зависимости от температуры указывается отдельно. При данной влажности давление воздуха будет 1024 мбар

Табл. 8: Состав атмосферного воздуха

		Низкий вакуум	Средний вакуум	Высокий вакуум	Сверхвысокий вакуум
Давление	p [мбар]	1013 – 1	1 – 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-7</sup>	< 10 <sup>-7</sup>
Кол-во частиц	n [см <sup>-3</sup> ]	10 <sup>19</sup> – 10 <sup>16</sup>	10 <sup>16</sup> – 10 <sup>13</sup>	10 <sup>13</sup> – 10 <sup>9</sup>	< 10 <sup>9</sup>
Длина свободного пути	λ [см]	< 10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup> – 10	10 – 105	> 10 <sup>5</sup>
Скорость соударения	Z <sub>a</sub> [1/см <sup>2</sup> ·с]	10 <sup>23</sup> – 10 <sup>20</sup>	10 <sup>20</sup> – 10 <sup>17</sup>	10 <sup>17</sup> – 10 <sup>13</sup>	< 10 <sup>13</sup>
Скорость соударений в объеме	Z <sub>v</sub> [1/см <sup>3</sup> ·с]	10 <sup>29</sup> – 10 <sup>23</sup>	10 <sup>23</sup> – 10 <sup>17</sup>	10 <sup>17</sup> – 10 <sup>9</sup>	< 10 <sup>9</sup>
Время образования моно-слоя	τ [с]	< 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup> – 100	> 100
Режим течения газа		Вязкостный	Кнутдсена (мол.-вязкостный)	Молекулярный	Молекулярный
Другие характеристики		Теплоперенос заивист от давления	Значительные изменения в теплопроводности газа	Значительное уменьшение в объеме	Частицы на поверхности преобладают над частицами в объеме

Табл. 9: Диапазоны давлений, используемые в вакуумной технологии и их характеристики

При комнатной температуре									
Стандартные значения 1 (мбар·л·с <sup>-1</sup> ·см <sup>-2</sup> )		Металлы 10 <sup>-9</sup> ... 10 <sup>-7</sup>				Неметаллы 10 <sup>-7</sup> ... 10 <sup>-5</sup>			
Скорость обезгаживания (стандарт значения) как функция времени									
Примеры	½ ч	1 ч	3 ч	5 ч	Примеры	½ ч	1 ч	3 ч	5 ч
Ag	$1.5 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-9}$		Кремний	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$3.5 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$
Al	$2 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-9}$			NBR	$4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Cu	$4 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	9	$3.5 \cdot 10^{-9}$	Оргстекло	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Нерж. сталь		$9 \cdot 10^{-8}$	$3.5 \cdot 10^{-8}$	$2.5 \cdot 10^{-8}$	FPM, FKM	$7 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-7}$

1 все значения сильно зависят от предварительной обработки!

Табл. 10: Скорость обезгаживания материалов



Серия	Номинал ширина (DN)		Внутренний диаметр (mm)	
	R5	R10		
	10			10
	16			16
			20	21
	25			24
			32	34
	40			41
			50	51
	63			70
			80	83
	100			102
			125	127
	160			153
			200	213
	250			261
			320	318
	400			400
			500	501
	630			651
			800	800
	1000			1000

Номинал. внутр. диаметры примерно соответствуют внутренним диаметрам компонентов трубопроводов" (DIN 2402 -1976)  
Слева указан предпочтительный номинал. внутр. диаметр

**Табл. 11: Номинальные внутренние диаметры DN и внутренние диаметры труб, переходников и агрегатов с круглым сечением (согласно стандарту PNEUROP)**

Растворитель	Относительная масса молекулы	Плотность г/см <sup>3</sup> (20 °С)	Точка замерзания °С	Точка кипения °С	Предельно-допустимая концентрация ПДК(МАС) см <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
Ацетон	58	0.798		56	
Бензол (раствор)	78	0.8788	5.49	80.2	25
Бензин (легкий )		0.68 ... 0.72		> 100	
четырёххлористый углерод	153.8	1.592	- 22.9	76.7	25
Хлороформ	119.4	1.48	- 63.5	61	50
диэтиловый эфир	46	0.7967	-114.5	78	1000
Этиловый спирт	74	0.713	- 116.4	34.6	400
Гексан	86	0.66	- 93.5	71	500
Изопропанол	60.1	0.785	- 89.5	82.4	400
Метанол	32	0.795	- 97.9	64.7	200 (токсичен!)
Метиленхлорид	85	1.328		41	
Нитрометан	61	1.138	- 29.2	101.75	100
Бензин эфин	Смесь	0.64	-	40 ... 60	
Трихлорэтилен ("Тгг")	131.4	1.47		55	
Вода	18.02	0.998	0.00	100.0	-

**Табл. 12: Важные характеристики общих растворителей**



t °C	ps Мбар	% <sub>D</sub> г/м <sup>3</sup>	t °C	ps Мбар	% <sub>D</sub> г/м <sup>3</sup>	t °C	ps Мбар	% <sub>D</sub> г/м <sup>3</sup>	t °C	Ps Мбар	% <sub>D</sub> г/м <sup>3</sup>
-100	1.403 · 10 <sup>-5</sup>	1.756 · 10 <sup>-5</sup>	-35	0.2233	0.2032	30	42.43	30.38	95	845.3	504.5
-99	1.719	2.139	-34	0.2488	0.2254	31	44.93	32.07	96	876.9	522.1
-98	2.101	2.599	-33	0.2769	0.2498	32	47.55	33.83	97	909.4	540.3
-97	2.561	3.150	-32	0.3079	0.2767	33	50.31	35.68	98	943.0	558.9
-96	3.117	3.812	-31	0.3421	0.3061	34	53.20	37.61	99	977.6	578.1
-95	3.784 · 10 <sup>-5</sup>	4.602 · 10 <sup>-5</sup>	-30	0.3798	0.3385	35	56.24	39.63	100	1013.2	597.8
-94	4.584	5.544	-29	0.4213	0.3739	36	59.42	41.75	101	1050	618.0
-93	5.542	6.665	-28	0.4669	0.4127	37	62.76	43.96	102	1088	638.8
-92	6.685	7.996	-27	0.5170	0.4551	38	66.26	46.26	103	1127	660.2
-91	8.049	9.574	-26	0.5720	0.5015	39	69.93	48.67	104	1167	682.2
-90	9.672 · 10 <sup>-5</sup>	11.44 · 10 <sup>-5</sup>	-25	0.6323	0.5521	40	73.78	51.19	105	1208	704.7
-89	11.60	13.65	-24	0.6985	0.6075	41	77.80	53.82	106	1250	727.8
-88	13.88	16.24	-23	0.7709	0.6678	42	82.02	56.56	107	1294	751.6
-87	16.58	19.30	-22	0.8502	0.7336	43	86.42	59.41	108	1339	776.0
-86	19.77	22.89	-21	0.9370	0.8053	44	91.03	62.39	109	1385	801.0
-85	23.53 · 10 <sup>-5</sup>	27.10 · 10 <sup>-5</sup>	-20	1.032	0.8835	45	95.86	65.50	110	1433	826.7
-84	27.96	32.03	-19	1.135	0.9678	46	100.9	68.73	111	1481	853.0
-83	33.16	37.78	-18	1.248	1.060	47	106.2	72.10	112	1532	880.0
-82	39.25	44.49	-17	1.371	1.160	48	111.7	75.61	113	1583	907.7
-81	46.38	52.30	-16	1.506	1.269	49	117.4	79.26	114	1636	936.1
-80	0.5473 · 10 <sup>-3</sup>	0.6138 · 10 <sup>-3</sup>	-15	1.652	1.387	50	123.4	83.06	115	1691	965.2
-79	0.6444	0.7191	-14	1.811	1.515	51	129.7	87.01	116	1746	995.0
-78	0.7577	0.8413	-13	1.984	1.653	52	136.2	91.12	117	1804	1026
-77	0.8894	0.9824	-12	2.172	1.803	53	143.0	95.39	118	1863	1057
-76	1.042	1.145	-11	2.376	1.964	54	150.1	99.83	119	1923	1089
-75	1.220 · 10 <sup>-3</sup>	1.334 · 10 <sup>-3</sup>	-10	2.597	2.139	55	157.5	104.4	120	1985	1122
-74	1.425	1.550	-9	2.837	2.328	56	165.2	109.2	121	2049	1156
-73	1.662	1.799	-8	3.097	2.532	57	173.2	114.2	122	2114	1190
-72	1.936	2.085	-7	3.379	2.752	58	181.5	119.4	123	2182	1225
-71	2.252	2.414	-6	3.685	2.990	59	190.2	124.7	124	2250	1262
-70	2.615 · 10 <sup>-3</sup>	2.789 · 10 <sup>-3</sup>	-5	4.015	3.246	60	199.2	130.2	125	2321	1299
-69	3.032	3.218	-4	4.372	3.521	61	208.6	135.9	126	2393	1337
-68	3.511	3.708	-3	4.757	3.817	62	218.4	141.9	127	2467	1375
-67	4.060	4.267	-2	5.173	4.136	63	228.5	148.1	128	2543	1415
-66	4.688	4.903	-1	5.623	4.479	64	239.1	154.5	129	2621	1456
-65	5.406 · 10 <sup>-3</sup>	5.627 · 10 <sup>-3</sup>	0	6.108	4.847	65	250.1	161.2	130	2701	1497
-64	6.225	6.449	1	6.566	5.192	66	261.5	168.1	131	2783	1540
-63	7.159	7.381	2	7.055	5.559	67	273.3	175.2	132	2867	1583
-62	8.223	8.438	3	7.575	5.947	68	285.6	182.6	133	2953	1627
-61	9.432	9.633	4	8.129	6.360	69	298.4	190.2	134	3041	1673
-60	10.80 · 10 <sup>-3</sup>	10.98 · 10 <sup>-3</sup>	5	8.719	6.797	70	311.6	198.1	135	3131	1719
-59	12.36	12.51	6	9.347	7.260	71	325.3	206.3	136	3223	1767
-58	14.13	14.23	7	10.01	7.750	72	339.6	214.7	137	3317	1815
-57	16.12	16.16	8	10.72	8.270	73	354.3	223.5	138	3414	1865
-56	18.38	18.34	9	11.47	8.819	74	369.6	232.5	139	3512	1915
-55	20.92 · 10 <sup>-3</sup>	20.78 · 10 <sup>-3</sup>	10	12.27	9.399	75	385.5	241.8	140	3614	1967
-54	23.80	23.53	11	13.12	10.01	76	401.9	251.5			
-53	27.03	26.60	12	14.02	10.66	77	418.9	261.4			
-52	30.67	30.05	13	14.97	11.35	78	436.5	271.7			
-51	34.76	33.90	14	15.98	12.07	79	454.7	282.3			
-50	39.35 · 10 <sup>-3</sup>	38.21 · 10 <sup>-3</sup>	15	17.04	12.83	80	473.6	293.3			
-49	44.49	43.01	16	18.17	13.63	81	493.1	304.6			
-48	50.26	48.37	17	19.37	14.48	82	513.3	316.3			
-47	56.71	54.33	18	20.63	15.37	83	534.2	328.3			
-46	63.93	60.98	19	21.96	16.31	84	555.7	340.7			
-45	71.98 · 10 <sup>-3</sup>	68.36 · 10 <sup>-3</sup>	20	23.37	17.30	85	578.0	353.5			
-44	80.97	76.56	21	24.86	18.34	86	601.0	366.6			
-43	90.98	85.65	22	26.43	19.43	87	624.9	380.2			
-42	102.1	95.70	23	28.09	20.58	88	649.5	394.2			
-41	114.5 · 10 <sup>-3</sup>	106.9 · 10 <sup>-3</sup>	24	29.83	21.78	89	674.9	408.6			
-40	0.1283	0.1192	25	31.67	23.05	90	701.1	423.5			
-39	0.1436	0.1329	26	33.61	24.38	91	728.2	438.8			
-38	0.1606	0.1480	27	35.65	25.78	92	756.1	454.5			
-37	0.1794	0.1646	28	37.80	27.24	93	784.9	470.7			
-36	0.2002	0.1829	29	40.06	28.78	94	814.6	487.4			

Табл.13: Давление насыщенного пара ps и плотность паров %<sub>D</sub> воды в диапазоне температур -100...+140°C



Группа А <sup>3)</sup>	Группа В <sup>3)</sup>	Группа С <sup>3)</sup>			
Метан	с	Этилен	с	Водород	С
Этан	с	Бута 1-3 диен	с	Ацетилен	С
Пропан	с	Акрилонитрил	с	Бисульфид углерода	С
Бутан	с	Цианид водорода	а	/сернистый углерод	
Пентан	с	Детил эфир (s)	с		
Гексан	с	Этилен оксид (оксиран)	с		
Гептан	с	1,4 диоксан	а		
Октан	а	Тетра гидро фуран	а		
циклогексан	с	Тетра фтор этилен	а		
пропилен	а				
стирол (s)	б				
бензол (s)	с				
толуол (s)	–				
ксилол, диметилбензол	а				
нафталин	–				
метанол (s)	с				
этанол (s)	с				
протиповый спирт (пропанол)	с				
бутиловый спирт (бутанол)	–				
фенол	а				
уксусный альдегид, ацетальдегид	с				
ацетон (s) (пропанон)	а				
метил этил кетон (s)	с				
этил ацетат (s)	–				
бутил ацетат (s)	–				
амилацетат (s)	б				
этил метилакрилат	а				
уксусная кислота	–				
метил хлорид (s)	а				
метилен хлорид (s) (дихлорметан)	–				
ацетонитрил аммиака	–				
анилин	–				

	Группа А <sup>3)</sup>	Группа В <sup>3)</sup>	Группа С <sup>3)</sup>
MESG <sup>1)</sup>	> 0.9 мм	0.5...0.9 мм	<0.5 мм
Отношение MIC <sup>2)</sup>	>0.8 мм	0.45...0.8 мм	<0.45 мм

1) минимальный искровой промежуток  
2) минимальный ток поджига (отношение по MIC для лаб. метана)  
3) расположение группы  
а – по значению MESG,  
б – по MIC,  
с – по обоим значениям,  
s – растворитель

Табл.14: Классификация опасных жидкостей (по EN 50.014)



Табл. 15: Химическая стойкость эластомеров,  
наиболее широко применяемых в качестве уплотнений

Среда	Нитрил- бутадиен- резина (NBR) Perbunan	хлоропрен (CR) неопрен Neo- prene	силиконовая резина	Фтор-резина (FPM, FKM) Vi- ton	тефлон (PTFE)	EPDM
уксусный альдегид, ацетальдегид	o	o	o	o	x	x
Уксусная кислота (кристаллы), чистая	-	o	-	o	x	-
Уксусная кислота, промышленная		x			x	
Уксусная кислота – пары	x	x		-	x	
Уксусная кислота, 20 %		x			x	x
Уксусная кислота, 50 %	o	x			x	x
Уксусная кислота, 80 %	o	o			x	
уксусный ангидрид	-	x			x	x
Ацето-уксусный сложный эфир				o	x	-
Ацетон	o	-		o	x	x
Ацетофенон	o				x	x
Ацетилен	x	-			x	x
Акрил нитрил			-	o	x	
Чистый воздух	x	x	x	x	x	x
Воздух, только	x	x	x	x	x	o
Жидкий аммиак	x	x	-	-	x	x
Аммиак газ	x	x		o	x	
Амилацетат	o	o		o	x	x
амиловый спирт	-	-	o	o	x	x
Анилин	o	o	x		x	x
Антраценовое масло	o	o	x		x	
ASTM масло №. 1	x	x	x	x	x	o
ASTM масло №2	x	x	x	x	x	o
ASTM масло №3	-	-	-	o	x	o
бензальдегид 100 %					x	x
Бензол	o	o		x	x	o
Бромид бензола	o	o			x	o
бензойная кислота					x	x
битум; асфальт					x	
Газ из печей (доменных)	x	x	x		x	-
Трифторид брома	x	x			x	
Бром	o	o		x	x	
Бутадиен					x	o
Бутан	x	-		x	x	o
Бутилацетат	o	o	o		x	-
бутиловые спирты	-	x	-	o	x	x
Бутил-гликоль	x	x			x	
Butyraldehyde	o	o		x	x	-
фенольное масло Carbolineum	o	o	x	x	x	o
Бисульфат углерода	o	o	-	x	x	o
Углекислый газ сухой	x	x	x		x	x
Углекислый газ влажный	x	x	x		x	
четырёххлористый углерод	o	o	o	x	x	o
Хлоруксусная кислота	o	o		o	x	x
Хлорированные растворители		o			x	
Хлор сухой					x	x
Хлорная вода	-	x		o	x	x
Хлор влажный	o	o		x	x	x
Хлор-бром-метан		o			x	-
Хлорбензол	o	o	o		x	o
Хлороформ	o	o		x	x	o
Хлорметил	o	-		x	x	o
цитрусовые масла	o	o			x	
Газ из коксовых печей	o	o			x	o
Кислота коксового масла Copra oil acid	-	o	-		x	
хлопковое масло	x	-		x	x	-
Крезол				x	x	o
сырая нефть		-		x	x	o



Циклогексан	x			x	x	o
Циклогексанон	o	o	o		x	o
Циклогексиламин					x	o
декалин, дека-гидронафталин	x				x	o
десмоцит Desmodur T	o	o			x	o
десмоцит Desmophene 2000	x				x	
Дибутилэтилен Dibutylphthalate	o	o	x	o	x	x
Дихлорэтилен Dichlorethylene					x	
Дихлорэтан			x	x	x	o
Диэтиламин	-	o			x	x
Диэтилен гликоль	x	x			x	x
Диэтил эфир Diethyl ether	o	-	o		x	o
Диэтил эфир Diethyl ether	o	o			x	-
Диэтилсебацинат	o	o			x	-
Дихлор бензол	o	o			x	o
Дихлорбутитен	x				x	o
дизельное топливо	o	-		x	x	o
Ди-изопропил кетон		o			x	x
(ди)метиловый эфир	o				x	x
Диметил анилин	o	o			x	
Диметил формаид,	o	o		o	x	-
Diocetylphthalate	o	o	x		x	-
Диоксан	o	o			x	-
Дифенил	o	o	-	x	x	o
Дифенил оксид		o			x	x
Edenol 888				x	x	
эфирные ( летучие ) масла	o	o	-		x	o
этилацетат (этиловый эфир уксусной кислоты)	o			o	x	x
Этан	x	-	o	x	x	o
этиловый эфир уксусной кислоты,	o	o	o	o	x	o
Этилакрилат				o	x	
Этиловый спирт, денатурат	-	-		-	x	
Этиловый спирт, чистый	-	-		-	x	x
Этил хлорид	x	-	o		x	-
Этилен бромид	o	o			x	
Хлор-этилен					x	-
Дихлор этилен	o	o		-	x	
этиленгликоль	x	x	o	x	x	x
Этиловый эфир	o	o		o	x	-
Этил силикат	x	x			x	
Этил акрилат					x	
жирные кислоты	-	-			x	
жирные спирты	x	x	x		x	-
Масла Fir leaf oil	x	o			x	
Фторбензол	x	o			x	o
фтористоводородная/плавиковая кислота, холодная , 5 %	x	x		x		
фтористоводородная/плавиковая кислота, холодная , чистая	-	x				
Формальдегид	x	-	x		x	x
Фомалин , 55 %	x	x			x	x
муравьиная кислота	-	-			x	-
Метил эфир муравьиной кислоты	o	-	-		x	
Фреон 11	x	x		o	x	
Фреон 12	x	x		-	x	-
Фреон 22	o	x		o	x	x
Фреон 113	x	x		x	x	
Фуран	o	o			x	o
Фурфурол Furfurol	o	o	o	o	x	
Газойль	x	-		x	x	o
Газы генераторов Generator gas	x	-	x		x	
Глицерин	x	x	x	x	x	x
Гликоль	x	x	x	x	x	x
Масло Halowax	o	o			x	
горючее масло (на угле)	o	o		x	x	
горючее масло (из нефти) солярка	x	-		x	x	o

Гептан	x	—	o	x	x	o
Hexaldehyde гексальдегид	o	o			x	x
Гексан	x	—	o	x	x	o
рабочая жидкость						
Рабочие масла DIN 51524	x	—	—	x	x	o
фосфорный эфир HFD	o	o	o		x	
Полигликоль Polyglycol water HFC (тосол)	x	—	x	x	x	x
бромисто-водородная кислота	o	o			x	x
бромисто-водородная кислота - кристаллин	x				x	
синильная кислота	—	—	x		x	
Бромистый водород					x	
Водородный газ 20	x	x	—		x	
сероводород			x	x	x	x
изобутиловый спирт	—	x			x	x
изопропиловый ацетат	o	o			x	—
изопропиловый спирт, изопропанол	—	x			x	x
хлорид изопропила	o	o			x	o
изопропиловый эфир		o			x	
Керосин	—	—		x	x	
керосин	x	—		x	x	o
светильный газ	—	—		x	x	o
малеиновый ангидрид					x	
Ртуть	x	x			x	x
Метан	x	—			x	—
Метан (шахтный газ )	x	x		x	x	—
Метиленхлорид	o	o		o	x	o
Метилакрилат				o	x	o
метиловый спирт (метанол)	—	—	x	o	x	x
Метил этил кетон	o	o		o	x	—
Метил изобутил кетон	o			o	x	—
Метилметакрилат	o	o		o	x	o
Метил салицилат	o	o			x	—
бензин-растворитель, лигроин нафта Naphthalene	o	o			x	o
Природный газ	—	x	—	x	x	—
Нитробензол	o	o		o	x	o
веселящий газ, закись азота	x				x	x
олеиновая кислота	x			x	x	o
апельсиновое масло	o	o		x	x	
Кислород	x	x		x	x	
Озон	o	—	x	x	x	x
пальмитиновая (гексадекановая) кислота	x	x			x	o
Кислота пальмового маслв	—	o	x		x	
Парафин	x	x	x		x	o
нефть парафинового основания	x	x			x	o
Пентахлордиферил Pentachlordiphenyl	o		x		x	o
Пентан	x	x	o	x	x	o
Перхлорэтилен	o	o		x	x	o
Бензин	x	—	o		x	o
бензин –спирт Petrol alcohol 3:1	—		o	x	x	
бензин –бензол 4:1	x	o	o	x	x	o
бензин –бензол 7:3	o	o	o	x	x	o
бензин –бензол 3:2	o	o	o	x	x	o
бензин –бензол 1:1	o	o	o	x	x	o
бензин –бензол 3:7	o	o	o	x	x	
бензин –бензол –эфир 5:3:2	o	o	o		x	o
Фенол	o	o	x	x	x	o
Фенилэтил эфир	o	o			x	o
карболовая кислота, фенол	o	o	—	—	x	—
Фосфористый хлорид	o	—			x	x
фталевый ангидрид	x	x	x		x	
Пиперидин	o	o			x	
Полигликоль	x				x	
Пропан газ	x	x	x	x	x	
Полипропилен оксид	o				x	—
пропиловый спирт		x		x	x	x



Pydraul F-9	o	o	x	x	x	
Pydraul AC	o		x	x	x	
Pydraul A 150	o		x		x	
Pydraul A 200	o		x	x	x	
Пиридин				o	x	–
салициловая кислота	x	x			x	x
Skydrol 500			x	o	x	x
Skydrol 7000			x		x	x
стеариновая (октадекановая) кислота	–				x	x
стирол ( этилен-бензол )	o	o		x	x	o
сера,	–	x	x	x	x	x
Диоксид серы	o	o	x		x	x
триоксид серы, суход	o	–		x	x	–
дёготь; гудрон; дегтярное масло	o				x	o
Тетра хлор этилен				x	x	o
Тетрагидрофуран	o	o			x	o
Тетралин	o	o	o		x	o
Толуол	o	o	o	x	x	o
трансформаторное масло	x	x		x	x	o
Автомобильное масло Train oil	o			x	x	–
Триэтаноламин	o	o			x	–
Три-буто-окси-этил Фосфат	o	o			x	o
Трибутил Фосфат	o	o		o	x	o
Трихлор этан	o	o		x	x	
Трихлорэтилен	o	o		x	x	o
Трихлорэтил фосфат 20	–	x			x	
Трихлорэтил фосфат 80	o	x			x	
трихлоруксусная кислота 60				x	x	–
Трикрезилфосфат	o		x	x	x	–
Скипидар	–	–		x	x	o
терпентиновое масло; живичный скипидар, чистый	x			x	x	o
Винилацетат, эфир винилуксусной кислоты	o		o		x	
Винилацетат –уксусная кислота 3:2	o	–	o	o	x	
хлористый винил, жидкий			x	x	x	
Вода 50	x	x	x	x	x	
Вода 100	x	–	x	x	x	
Wood oil		–			x	
Ксиломон Xylamon	o	o	x		x	o
ксилол, диметилбензол	o	o	o	x	x	o

Табл.15: Химическая стойкость эластомеров, наиболее широко применяемых в качестве уплотнений



Табл.16: Символы, используемые в вакуумной технологии

## Вакуумные символы

Все символы, кроме отмеченных звездочкой \* не зависят от расположения.

\* - эти символы могут использоваться только в указанном здесь положении

Символы вакуумных насосов всегда следует располагать так, чтобы сторона конструкции располагалась со стороны более высокого давления.

## Вакуумные насосы

	Вакуумный насос, общее обозначение
	Поршневой вакуумный насос
	Диафрагменный
	Вращательный объемный *
	Вращательный плунжерный * Золотниковый
	Насос со скользящим ротором *
	Насос с вращающимся поршнем *
	Водокольцевой*
	Насос Рутса*
	Турбинный насос, общее обозначение
	Насос с радиальным потоком
	Насос с осевым потоком
	турбомолекулярный насос
	Эжекторный *

	Диффузионный *
	Адсорбционный *
	Геттерный
	Магнетронный
	Крионасос
	Спиральный *
	Испарительный





## Принадлежности

	Конденсирующая ловушка, общее обозначение
	Конденсирующая ловушка с теплообменником (охлаждением)
	Газовый фильтр, общее обозначение
	Фильтрующий аппарат, общее
	Экран, общее
	Холодный экран
	Заливная охлаждающая ловушка, общее
	Заливная охлаждающая ловушка с резервуаром
	Сорбционная ловушка
	Дроссель

## Вакуумные камеры

	Вакуумная Камера, общее
	Вакуумная камера с колпаком







## Запорные устройства

	Клапан, общее обозначение
	проходной клапан
	Угловой клапан
	запорный клапан затвор
	Трехходовой за-порный клапан
	Угловой запорный клапан
	Вакуумный затвор, шибер
	поворотная заслонка
	обратный клапан
	предохранительный клапан

## Принцип действия

	Ручной
	Клапан переменного сечения – натекатель
	Электромагнитный
	Пневматический или гидравлический
	С электродвигателем
	Подпружиненный

## Соединения и трубопроводы

	Фланцевое соединение, общее
	Фланцевое соединение болтовое
	Фланцевое соединение, маленькие фланцы,
	Фланцевое соединение хомутовое
	Резьбовое соединение трубопроводов
	шаровой шарнир
	раструбное соединение, замковое стыковое соединение
	соединение с конусной нарезкой
	пересечение двух трубопроводов с соединением
	пересечение двух трубопроводов без соединения
	Место ответвления
	Соединение трубопроводов
	Сильфон, гибкий шланг
	Ввод возвратно-поступательного движения на фланце
	Ввод возвратно-поступательного движения без фланца
	Ввод движения
	Ввод вращательного движения
	Электрический ввод

## Вакуумметры и измерения

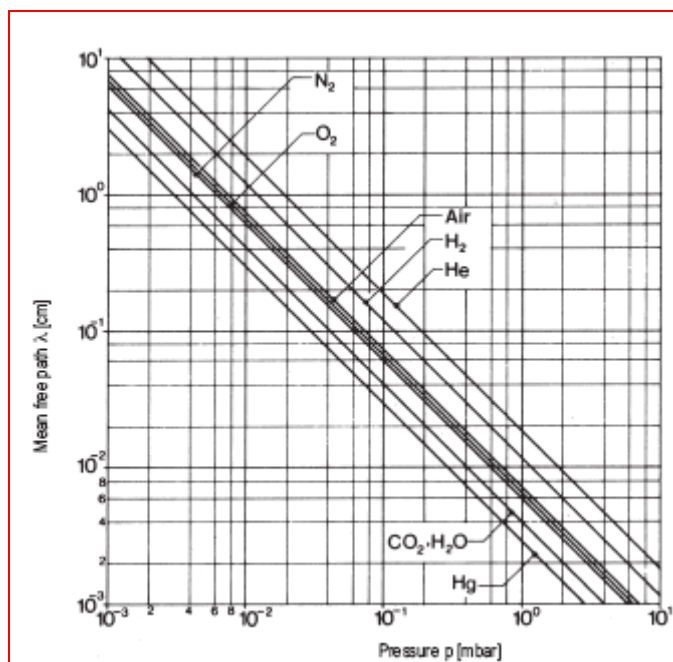
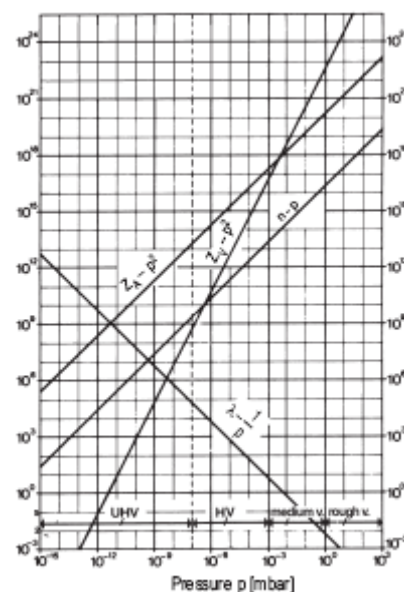
	Общий символ для вакуума *
	Преобразователь вакуумметра *
	Вакуумметр, отображающий показания преобразователя
	Вакуумметр с возможностью записи*
	Вакуумметр с аналоговым дисплеем *
	Вакуумметр с цифровым дисплеем *
	Измерение производительности (расхода, потока)

Табл.16: Символы, используемые в вакуумной технологии

	Кельвин	Цельсий	Реомюр	Фаренгейт	Ранкин
Точка кипения H <sub>2</sub> O	373	100	80	212	672
Температура тела 37 °C	310	37	30	99	559
Комнатная температура	293	20	16	68	527
Точка замерзания H <sub>2</sub> O	273	0	0	32	492
NaCl/H <sub>2</sub> O 50:50	255	-18	-14	0	460
Точка замерзания Hg	34	-39	-31	-39	422
CO <sub>2</sub> (сухой лед)	195	-78	-63	-109	352
Точка кипения N <sub>2</sub>	77	-196	-157	-321	170
Точка абсолютного нуля	0	-273	-219	-460	0

	Кельвин	Цельсий	Реймюр	Фаренгейт	Ранкин
Кельвин, К	1	K - 273	$\frac{4}{5}(K - 273)$	$\frac{9}{5}(K - 273) + 32$	$\frac{9}{5}K = 1,8 K$
Цельсий	°C + 273	1	$\frac{4}{5} \cdot ^\circ C$	$\frac{9}{5} \cdot ^\circ C + 32$	$\frac{9}{5} (^{\circ}C + 273)$
Реймюр	$\frac{5}{4} \cdot ^\circ R + 273$	$\frac{5}{4} \cdot ^\circ R$	1	$\frac{9}{4} \cdot ^\circ R + 32$	$\frac{5}{9} \left[ \frac{5}{4} (^{\circ}R + 273) \right]$
Фаренгейт	$\frac{5}{9} (^{\circ}F - 32) + 273$	$\frac{5}{9} (^{\circ}F - 32)$	$\frac{4}{9} (^{\circ}F - 32)$	1	$^{\circ}F + 460$
Ранкин	$\frac{5}{9} (^{\circ}R)$	$\frac{5}{9} (^{\circ}R - 273)$	$\frac{4}{5} \left[ \frac{5}{9} (^{\circ}R - 273) \right]$	$^{\circ}R - 460$	1

Табл.17: Сравнение температур и таблица соотношения

Рис.9.1: Зависимость длины свободного пути  $\lambda$  (см) от давления для различных газов

$\lambda$  Длина свободного пути, см ( $\lambda \approx 1/p$ )  
 $n$  Количество частиц,  $1/\text{см}^3$  ( $n \sim p$ )  
 $Z_A$  Скорость соударения на поверхности  $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ,  $Z_A \sim p^2$   
 $Z_V$  Скорость соударения в объеме  $1/\text{см}^3 \cdot \text{с}$ ,  $Z_V \sim p^3$

Рис.9.2: Диаграмма кинетики газов для воздуха при 20°C

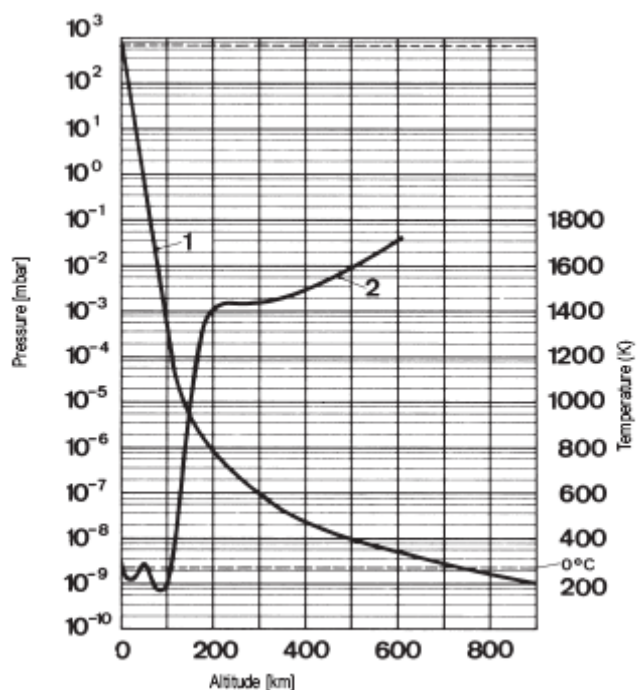


Рис.9.3: Понижения давления воздуха и изменение температуры как функция от высоты над уровнем моря

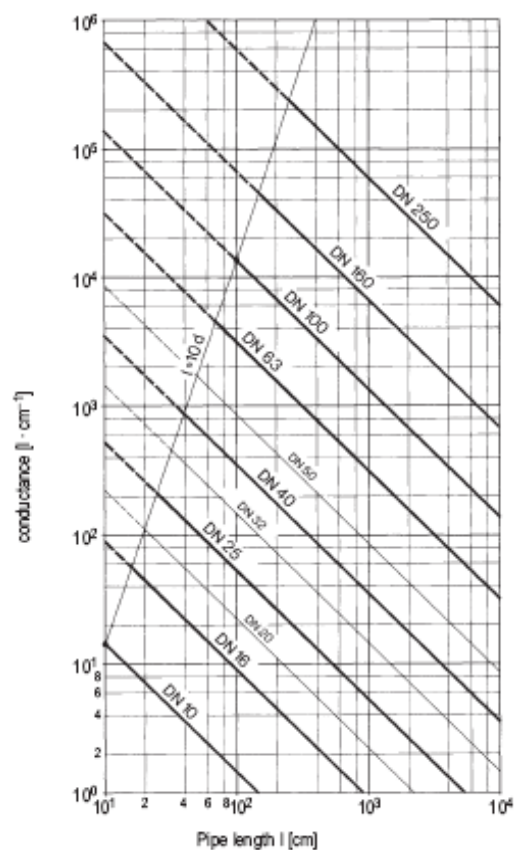


Рис.9.5: Значения проводимости для трубопроводов круглого сечения с наиболее часто используемыми значениями внутренних диаметров для вязкостного потока ( $p=1$  мбар)

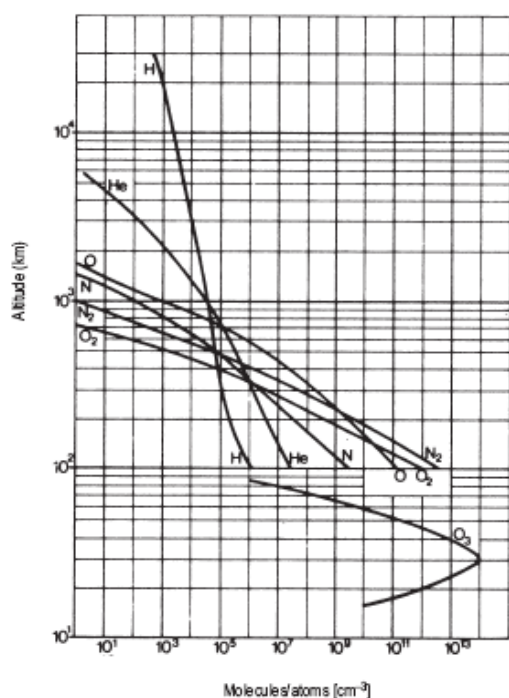


Рис.9.4: Изменение состава атмосферного воздуха как функция от высоты над уровнем моря

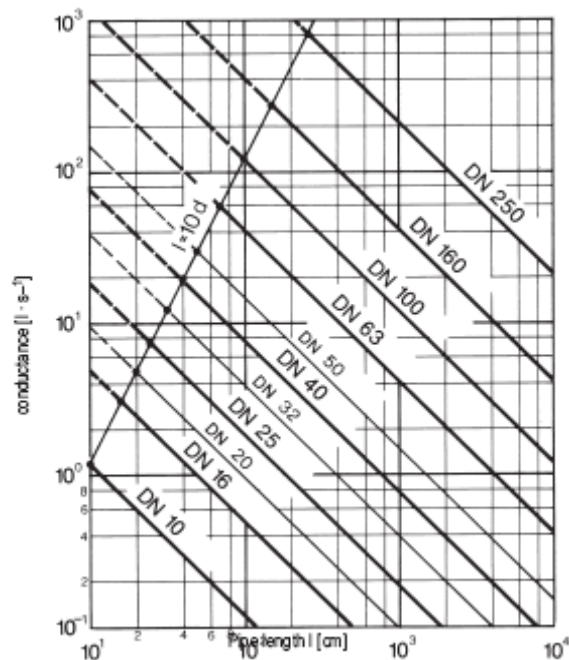
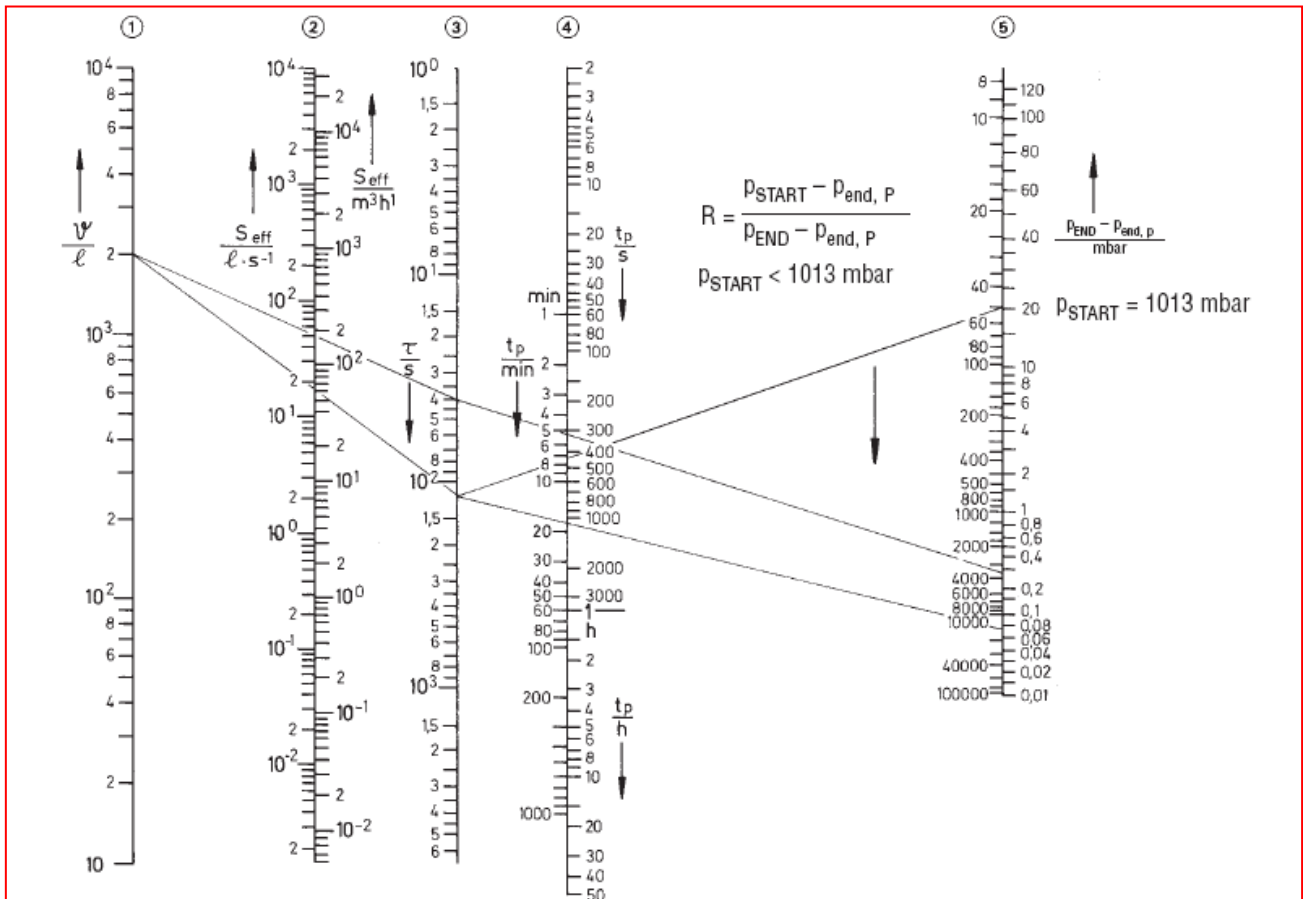


Рис.9.6: Значения проводимости для трубопроводов круглого сечения с наиболее часто используемыми значениями внутренних диаметров для молекулярного потока





Колонка (к1) – объем камеры, л  
 Колонка (к2) – макс. эффективная быстрота действия в объеме (л/с, слева или м<sup>3</sup>/ч справа)  
 Колонка (к3) – время откачки t<sub>p</sub> в сек (верх-справа), мин (левый-центр), час (низ-справа)  
 Колонка (к4) – давление P<sub>END</sub> в конце периода по истечении времени откачки, если вначале было атмосферное (P<sub>start</sub>=1013 мбар). Нужное давление P<sub>END</sub> снижается до предельного давления p<sub>ult</sub>, а перепад давлений указан в колонке. Если есть поток натекания q<sub>pV.in</sub> в колонке указывается  

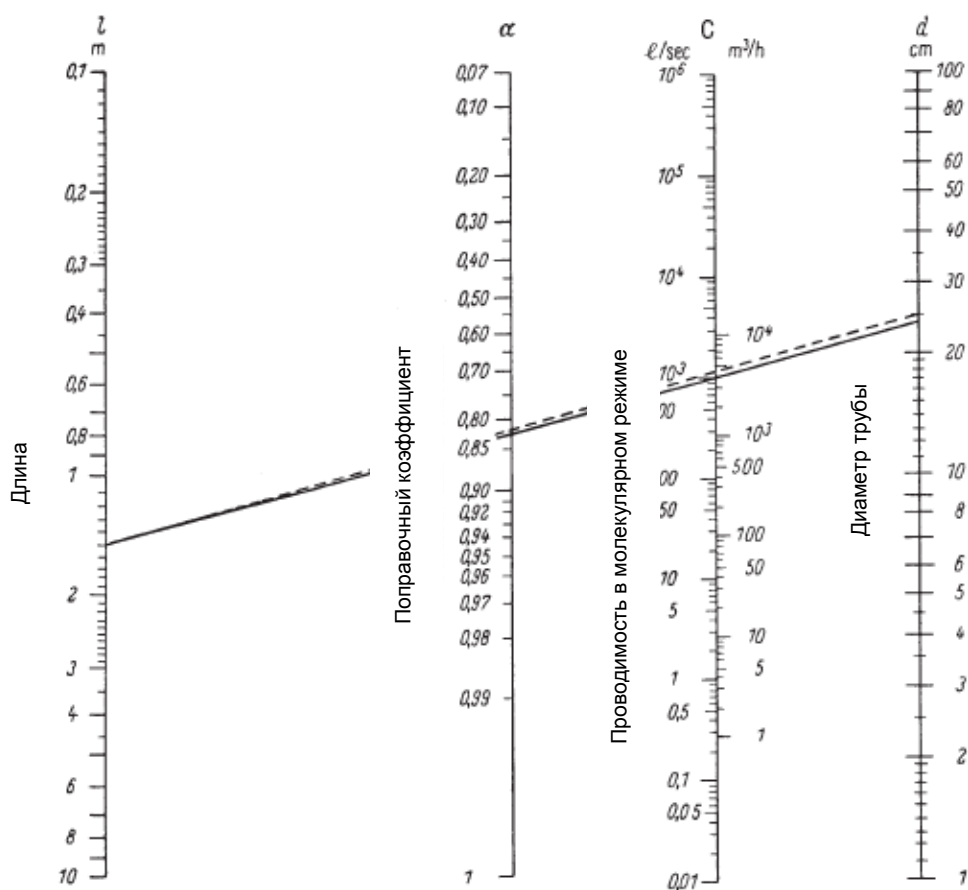
$$P_{end} = P_{ult,p} - q_{pV.in} / S_{eff,max}$$
 Слева: соотношение снижения давления  $R = (P_{start} - P_{ult,p} - q_{pV.in} / S_{eff,max}) / (P_{end} - P_{ult,p} - q_{pV.in} / S_{eff,max})$ . Если в начале давление - p<sub>start</sub> во время откачки давление снизится до p<sub>end</sub>. Зависимость давления от быстроты действия определяется по номограмме и указывается в колонке (к5) через p<sub>ult</sub>. Если предельное давление p<sub>ult</sub> маленькое по отношению к конечному P<sub>end</sub>, необходимо в конце периода откачки, то это соответствует постоянному значению быстроты действия S или S<sub>eff</sub> во время откачки

**Пример 1:**  
 Камера объемом 2000 л будет откачиваться от атмосферного давления p<sub>start</sub>=1000 мбар до p<sub>end</sub>=10<sup>-2</sup> мбар. с помощью плунжерного насоса с эффективной быстротой действия в камере S<sub>eff,max</sub>=60 м<sup>3</sup>/ч=16,7 л/с. определим время откачки по номограмме в 2 шага:  
 1. определение t: проводится прямая линия через 2000 л (к1), S<sub>eff</sub>=16,7 л/с (к2) и время t=120 с (к3) = 2 мин - результат пересечения прямой с графиком к3. погрешность при выполнении этих действий примерно Dt=±10 с, т.е. относительная погрешность около 10%.  
 2. определение времени t<sub>p</sub>: предельное давление выбранного насоса p<sub>ult,p</sub> = 3 · 10<sup>-2</sup> мбар, система считается чистой и герметичной (q<sub>pV.in</sub> = 0); т.е. p<sub>START</sub> - p<sub>ult,p</sub> = 10<sup>-1</sup> - 3 · 10<sup>-2</sup> = 7 · 10<sup>-2</sup> мбар. теперь проводится прямая через точку, найденную выше t = 120 с (к3) и точку P<sub>END</sub> - p<sub>ult,p</sub> = 7 · 10<sup>-2</sup> мбар (к5) пересечение с колонкой 4 даст t<sub>p</sub> = 1100 с = 18.5 мин. (снова относительная погрешность в этом случае около 10 % поэтому относительная погрешность всего t<sub>p</sub> около 15 %.) учитывая дополнительный коэффициент безопасности 20 %, можно считать время откачки t<sub>p</sub> = 18.5 мин · (1 + 15 % + 20 %) = 18.5 · 1.35 = 25 мин.

**Пример 2**  
 Чистая сухая вакуумная система (q<sub>pV.in</sub> = 0) объемом V = 2000 л откачивается до давления p<sub>END</sub> = 10<sup>-2</sup> мбар. т.к. это давление меньше предельного давления поршневого насоса (S<sub>eff,max</sub> = 60 м<sup>3</sup>/ч = 16.7 л/с (s<sup>-1</sup> = 3 · 10<sup>-2</sup> мбар), необходимо использовать насос Рутса вместе с поршневым. Получим давление запуска p<sub>1</sub> = 20 мбар, быстрота действия S<sub>eff,max</sub> = 200 м<sup>3</sup>/ч = 55 л/с, p<sub>ult,p</sub> = 4 · 10<sup>-3</sup> мбар. от p<sub>start</sub> = 1000 мбар до p = 20 мбар можно работать с одним поршневым насосом, затем подключить насос Рутса от p<sub>1</sub> = 20 мбар до p<sub>END</sub> = 10<sup>-2</sup> мбар. Тогда вращательный насос работает как форвакуумный. Для первой ступени откачки постоянная времени τ = 120 с = 2 мин (из примера 1 : прямая через V = 2000 л, S<sub>eff</sub> = 16.7 л/с. если эту точку в к3 соединить с точкой p<sub>1</sub> - p<sub>ult,p</sub> = 20 - 3 · 10<sup>-2</sup> = 20 мбар (p<sub>ult,p</sub> игнорируется, т.е. вращательный насос имеет постоянную быстроту действия в диапазоне 1000 ...20мбар) к к5, получим t<sub>p,1</sub> = 7.7 мин. насос Рутса должен снизить давление от p<sub>1</sub> = 20 мбар до p<sub>END</sub> = 10<sup>-2</sup> мбар, т.е. коэффициент снижения давления R = (20 - 4 · 10<sup>-3</sup>) / (10<sup>-2</sup> - 4 · 10<sup>-3</sup>) = 20/6 · 10<sup>-3</sup> = 3300 мбар. получим постоянную времени (прямая V = 2000 л в к1, S<sub>eff</sub> = 55 л/с в к2) при 37с (в к3). Эту точку соединим с R = 3300 в к5, и получим в к4 t<sub>p,2</sub> = 290 с = 4.8 мин. If one takes into account tu = 1 min for the changeover time, this results in a pump-down time of t<sub>p</sub> = t<sub>p1</sub> + tu + t<sub>p2</sub> = 7.7 min + 1 min + 4.8 min = 13.5 min

Рис.9.7: Номограмма для определения времени откачки t<sub>p</sub> камеры в области низкого вакуума





Пример: какой диаметр  $d$  должен иметь трубопровод длиной 1.5 м с проводимостью  $C=1000$  л/с в области молекулярного режима течения? Точки  $l = 1.5$  м и  $C = 1000$  л/с соединяют прямой линией, которая продлевается до пересечения со шкалой диаметров  $d$ . Получим значение  $d = 24$  см. Входная проводимость, которая зависит от соотношения  $d/l$  и должна быть незначительной в случае коротких

трубок учитывается за счет поправочного коэффициента  $\alpha$ . для  $d/l < 0.1$ ,  $\alpha$  может быть равно 1. в нашем примере  $d/l = 0.16$   $\alpha = 0.83$  (точка пересечения со шкалой). Эффективная проводимость трубопровода снизится  $C \cdot \alpha = 1000 \cdot 0.83 = 830$  л/с. если  $d$  увеличить до 25 см, получим проводимость  $1200 \cdot 0.82 = 985$  л/с (штриховая линия).

Рис.9.8: Номограмма для определения проводимости труб круглого сечения по воздуху при 20°C для молекулярного режима течения

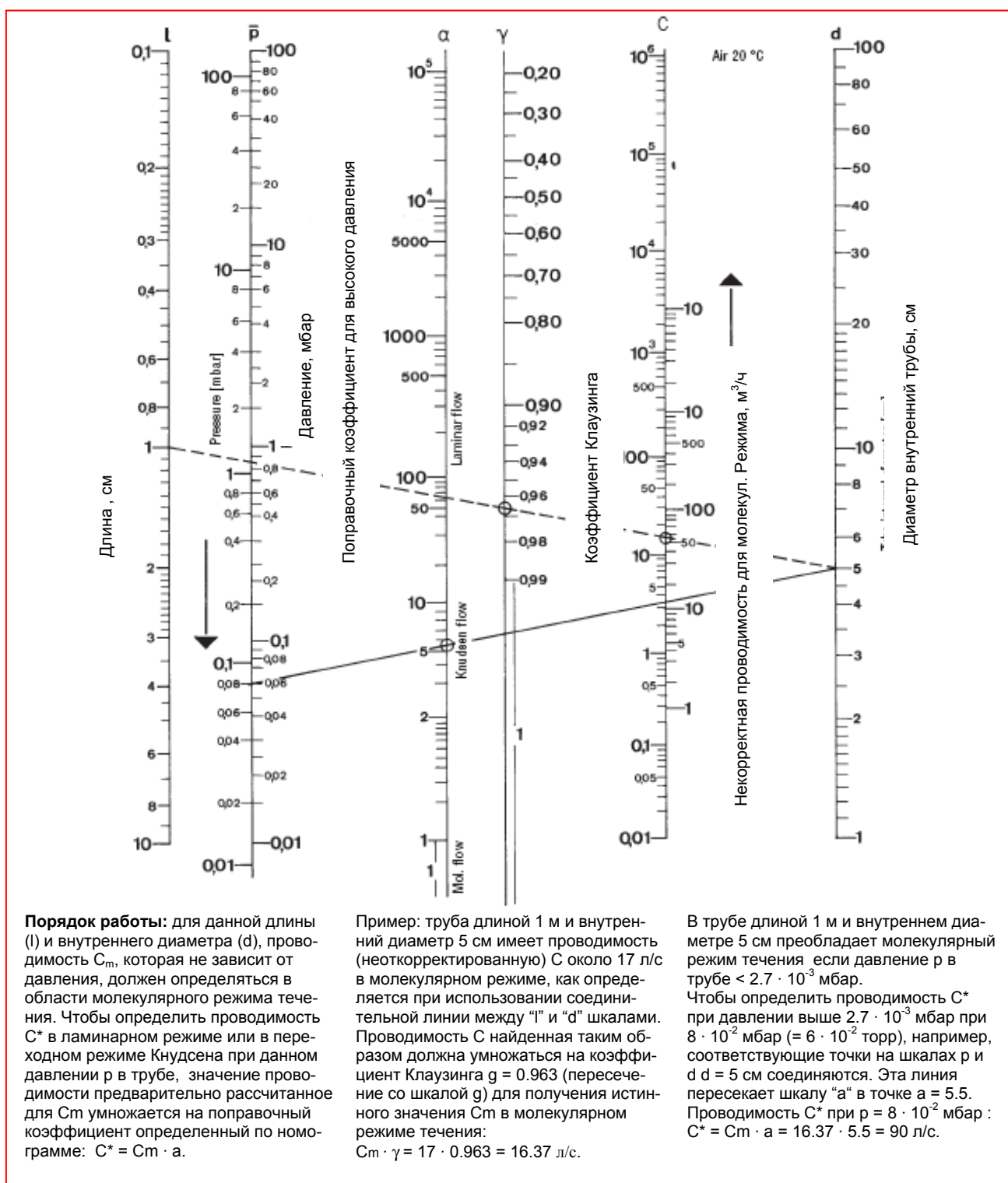


Рис.9.9: Номограмма для определения проводимости труб в заданном диапазоне давлений

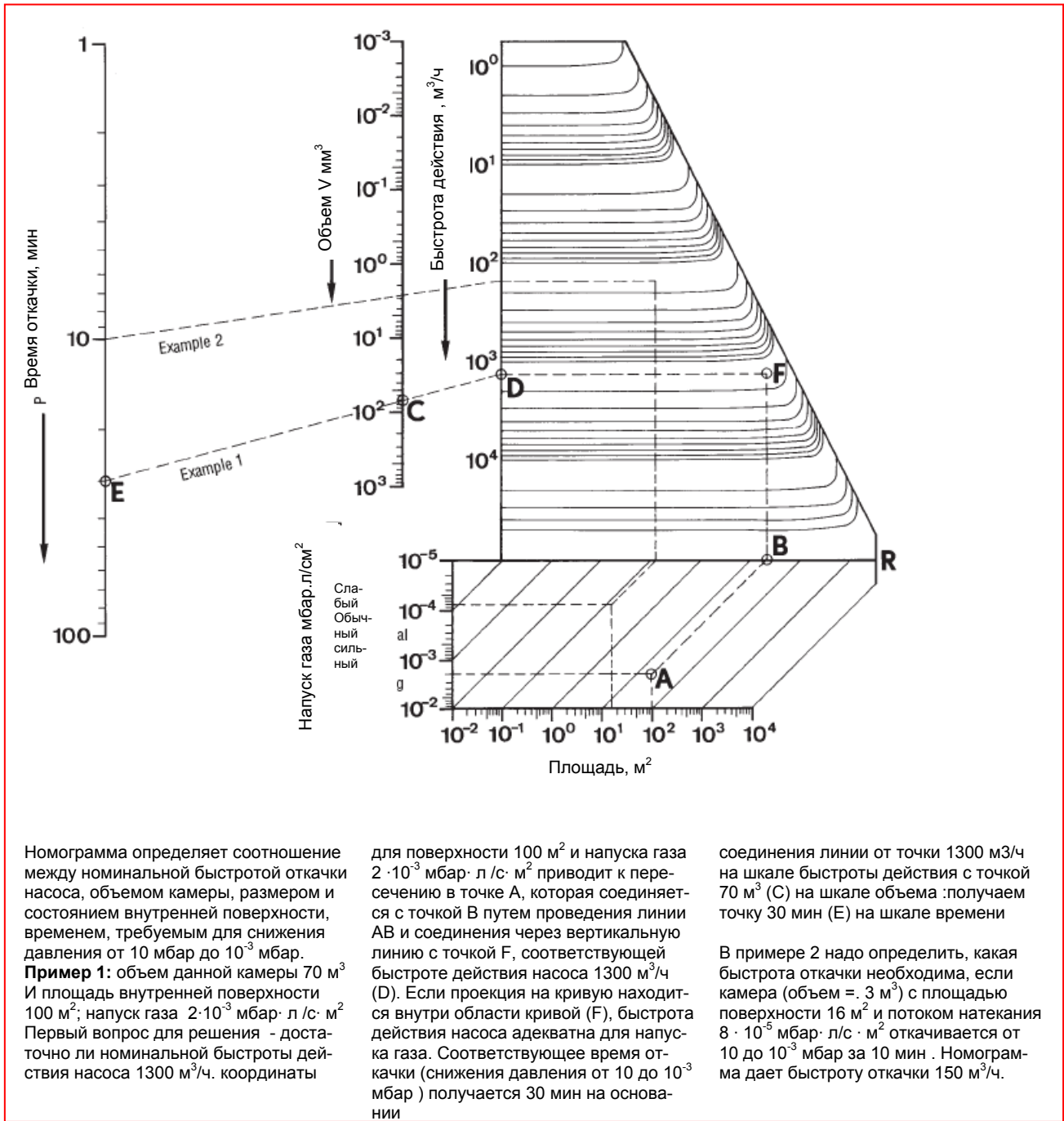


Рис.9.10: Определение времени откачки в области среднего вакуума с учетом газовыделения со стенок



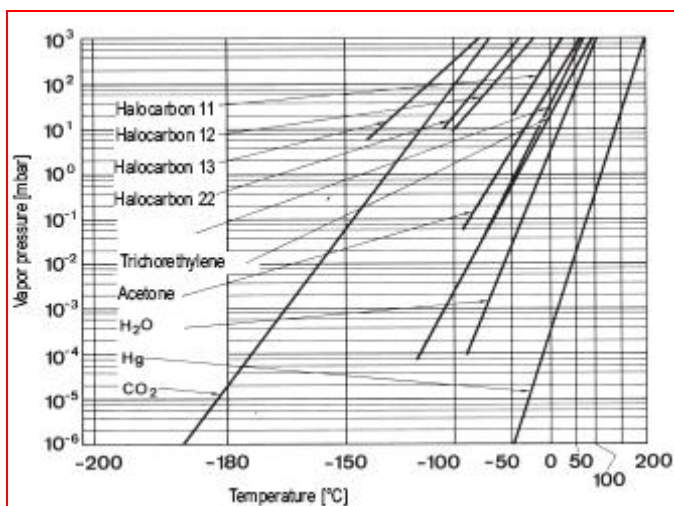


Рис.9.11: Давление насыщенного пара для различных веществ

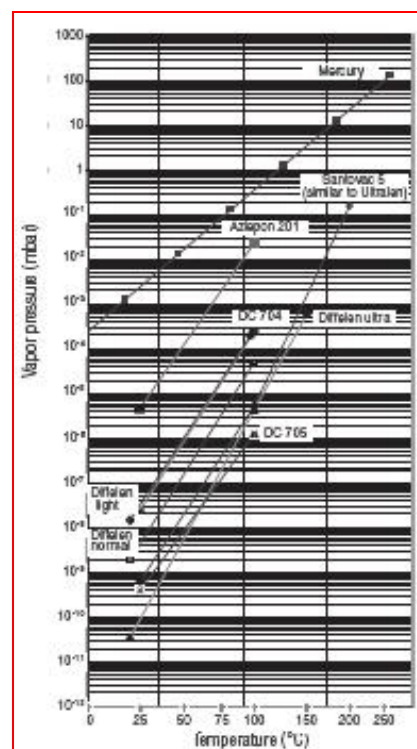


Рис.9.12: Давление насыщенного пара рабочей жидкости (масла и ртути) насоса

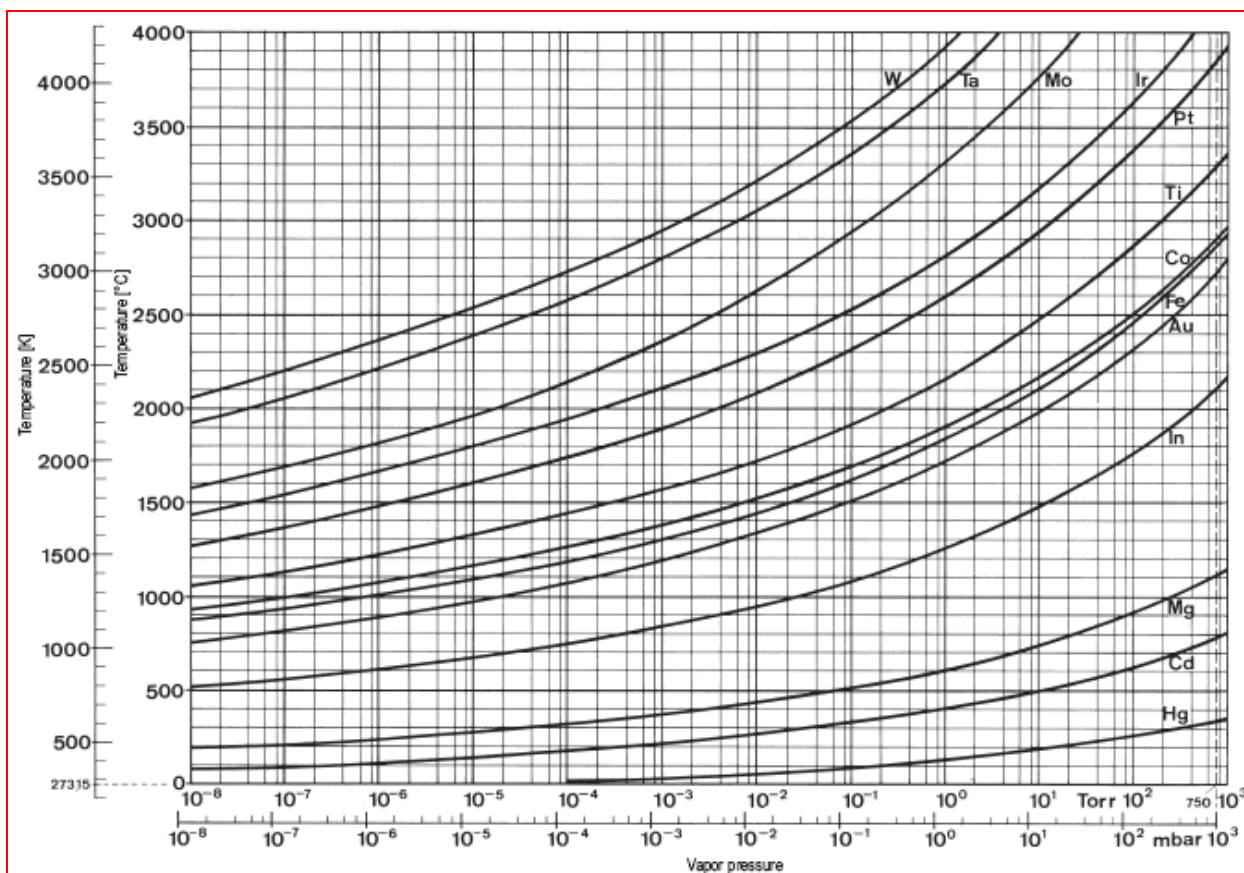
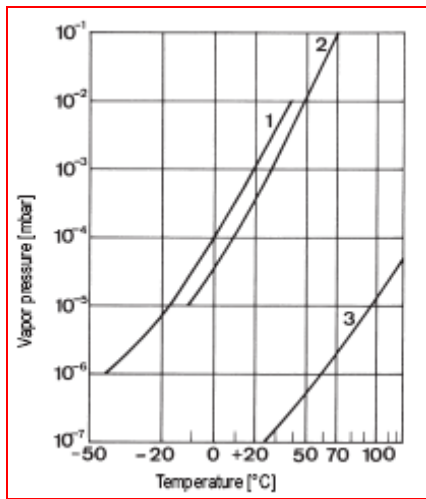


Рис.9.13: Давление насыщенного пара основных металлов, используемых в вакуумной технологии



1 NPB пербуран      2 силиконовая резина      3 тефлон

Рис.9.14: Давление пара неметаллических уплотнений (кривая давления пара фторэластомера лежит между кривыми для силикона и тефлона)

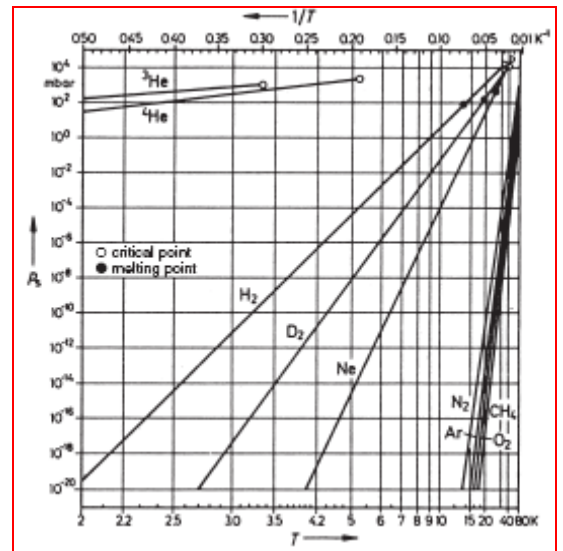
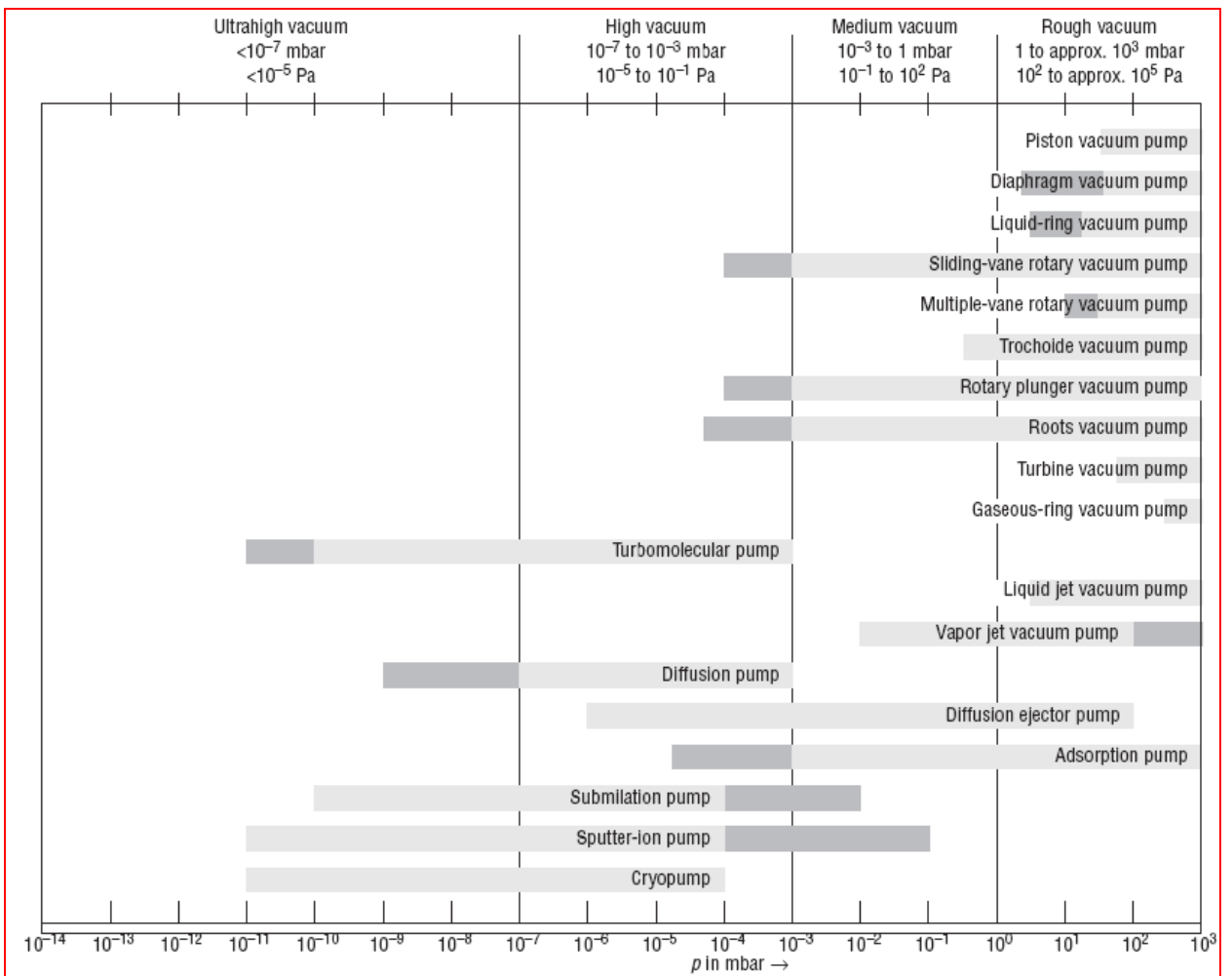


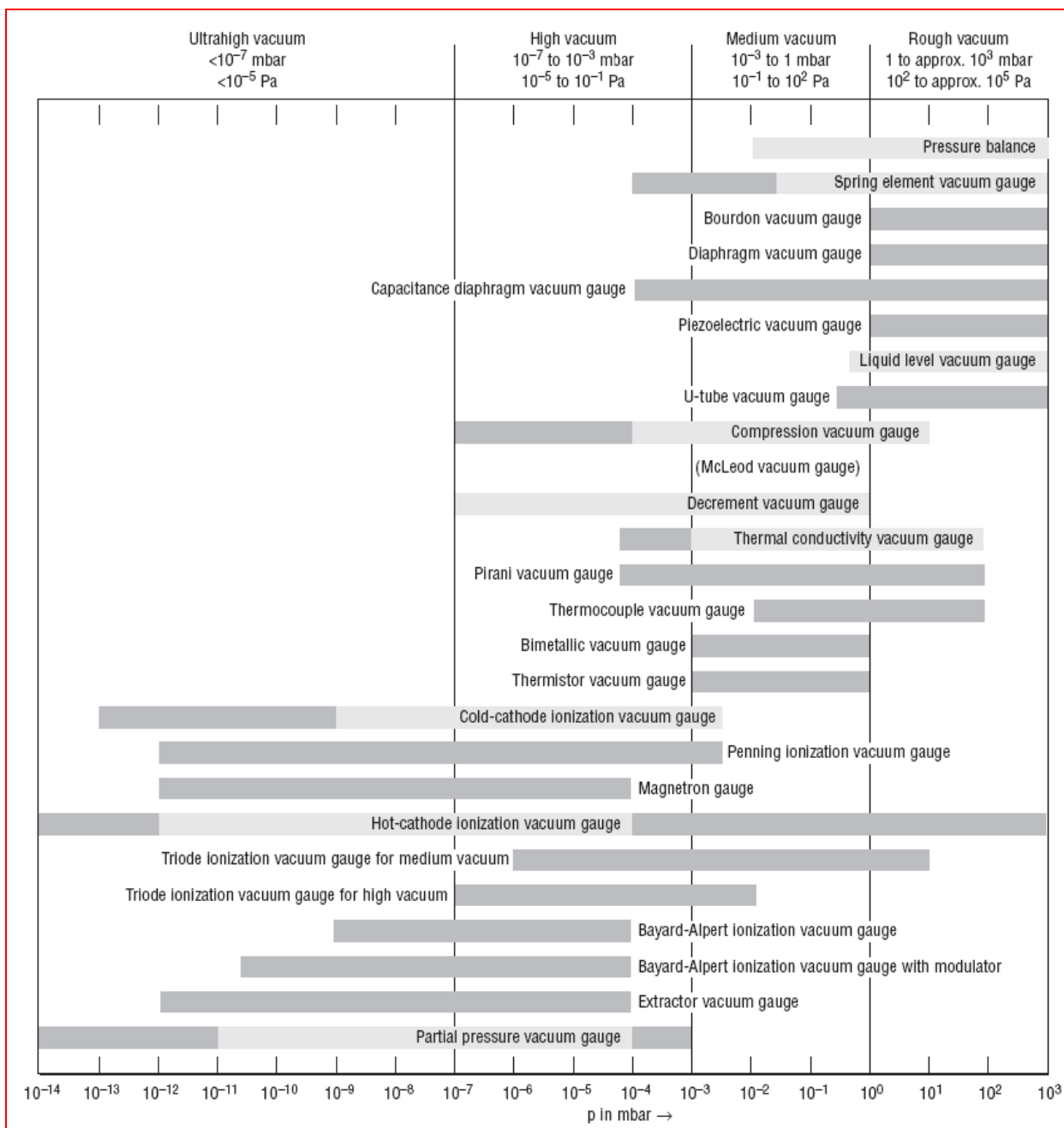
Рис.9.15: Давление насыщенного пара  $p_s$  различных веществ для криогенных технологий при температурах  $T=2-80K$ .



■ рабочий диапазон некоторых моделей      □ обычный диапазон давления

Рис.9.16: Рабочие диапазоны вакуумных насосов





рабочий диапазон некоторых моделей
  обычный диапазон давления

Рис.9.16: а) Диапазоны измерений вакуумметров

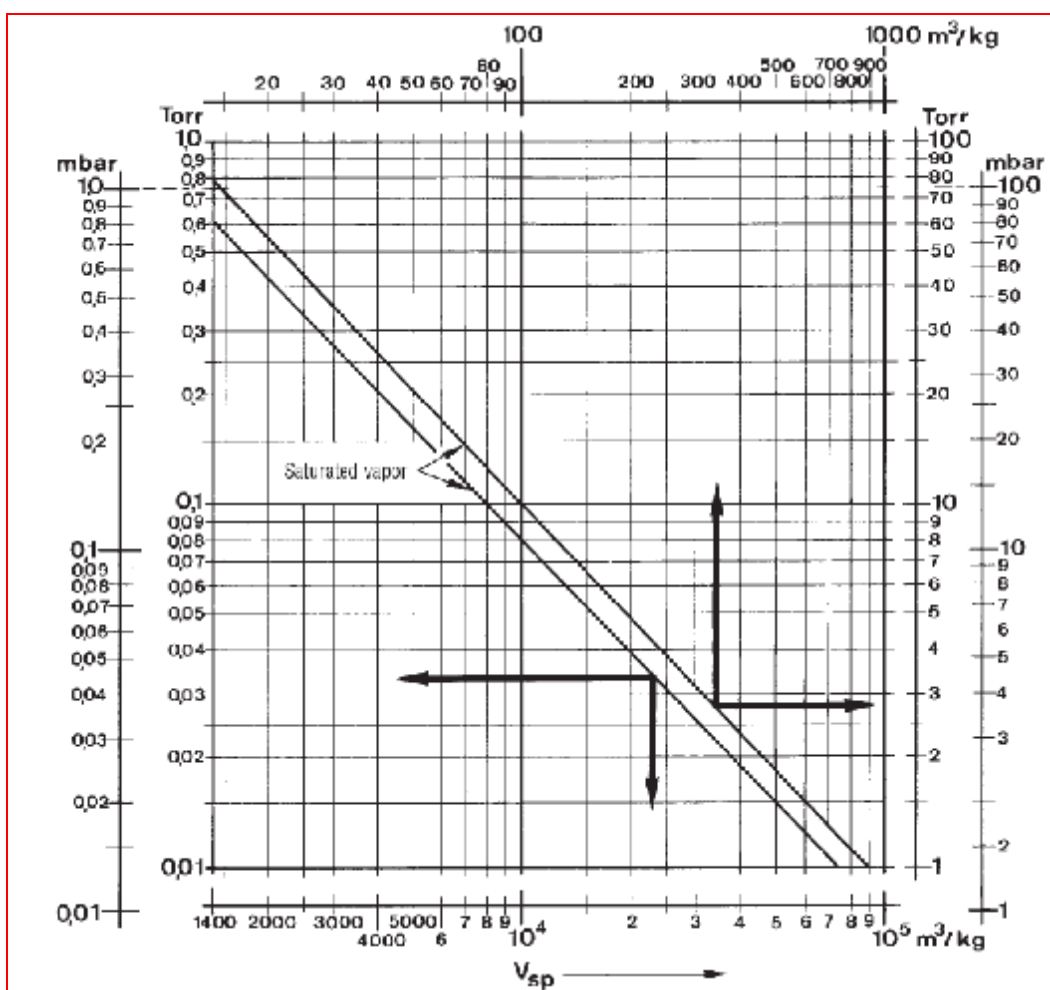


Рис.9.17: Удельный объем насыщенных паров воды

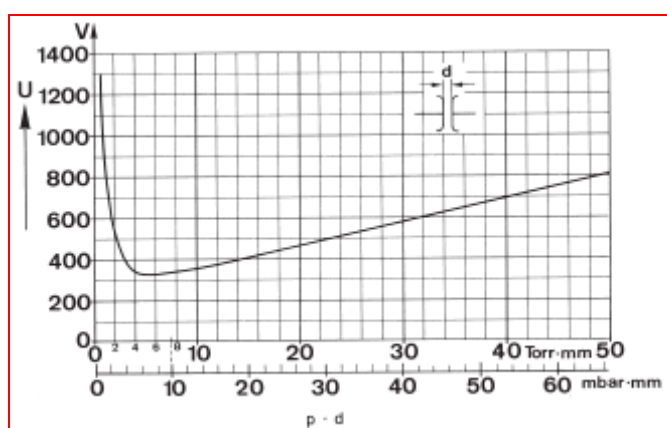


Рис.9.18: Напряжение пробоя между электродами для воздуха (кривая Паше)



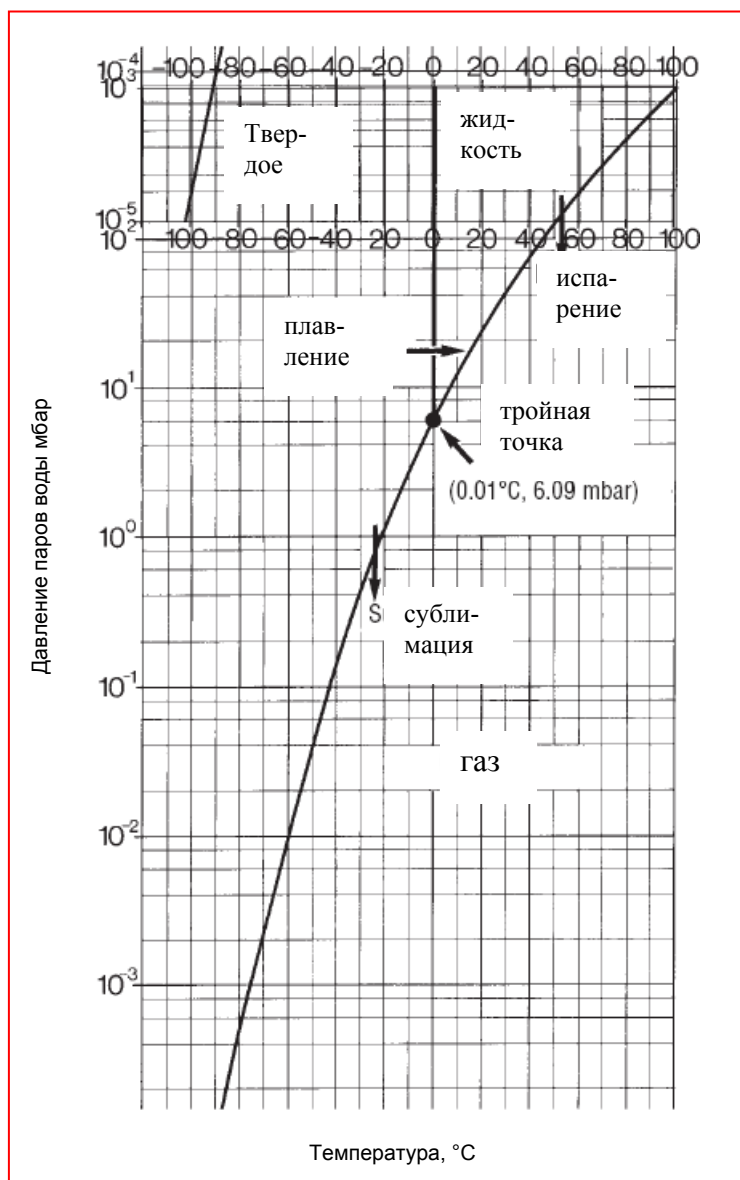


Рис. 9.19: Диаграмма фаз воды

## 10 Единицы измерения, используемые в вакуумной технологии

### 10.1 Введение

В официальных и деловых документах, относящихся к измерениям, необходимо использовать государственные законы и соответствующие принятые стандарты и единицы измерения. Следует так же учитывать все основные определения и стандарты, принятые в вакуумной технике. Большинство единиц измерения, использовавшихся в прошлом, таких как торр, гаусс, стандартный м<sup>3</sup>, атмосфера, пуаз, килокалория, килограмм-сила и т.п. больше не допустимы. Вместо них используются другие единицы измерения, некоторые из них новые, а некоторые использовались ранее в других отраслях науки и техники. Список в разделе 10.2 содержит основные переменные, используемые в вакуумной технике вместе с их символами и используемыми сегодня единицами измерения, включая единицы SI и допустимыми единицами измерения, являющимися производными от основных. Комментарии к списку приведены в разделе 10.3. Целью комментариев является, с одной стороны, установление соотношений с ранее использовавшимися параметрами, а с другой стороны, объяснение практического использования переменных.

Единицы измерения основаны на семи основных единицах измерения их системы SI – Международной системе единиц измерений.

Единицы измерения включают:

- 1) базовые единицы измерения СИ SI – табл. 10.4.1.
- 2) единицы измерения, являющиеся производными от основных, которые в некоторых случаях имеют собственное название и обозначение (табл. 10.4.2 и 10.4.4).
- 3) единицы измерения, используемые в атомной физике (табл. 10.4.3).
- 4) доли и части единиц измерения, имеющие собственные названия, например:  
 $10^5 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ бар}$ ,  
 $1 \text{ дм}^3 = 1 \text{ л}$ ,  
 $10^3 \text{ кг} = 1 \text{ т}$

Подробное описание приведено в работах W. Haeder и E. Gartner (DIN), IUPAP 1987 и S. German, P. Draht (PTB). Рекомендуем обращаться к работам этих авторов в случае возникновения вопросов, касающихся вакуумной технологии.

### 10.2 Список переменных, символов и единиц измерения, используемый в вакуумной технологии и областях ее применения (DIN 28 402)

Список основан на работе, выполненной профессором, доктором I. Luckert, которому мы выражаем огромную благодарность.

№	Переменная	Символ	Единицы измерения SI	Предпочтительные единицы измерения	Некомментария в разд10.3	Примечание
1	Излучение (радиоактивность)	A	s <sup>-1</sup> (Bq беккерель)	s <sup>-1</sup>	3/1	
2	(общая газовая постоянная )				–	№73
3	Работа	W	Дж	Дж , кк, кВт, Ws		
4	Атомная единица массы	mu	Кг	Кг, мг		См. Табл. V в разделе 9
5	Число Авогадро	N <sub>A</sub>	1/моль	1/моль		
6	Ускорение	a	м/с <sup>2</sup>	м/с <sup>2</sup> · см/с <sup>2</sup>		
7	Постоянная Больцмана	k	Дж/К	Дж/К, мбар.л/К		См. Табл. V в разделе 9
8	Температура в градусах Цельсия	J (тета)	–	°C	3/2	
9	Давление пара	p <sub>v</sub>	Н/м <sup>2</sup> , Па	Мбар, бар	3/3	Па = Pascal
10	Время	t	с	с, мин, ч		Табл. 10.4.4
11	Плотность (плотность газа)	ρ (ро)	Кг/м <sup>3</sup>	Кг/м <sup>3</sup> · г/см <sup>3</sup>	3/6	
12	Диэлектрическая постоянная	ε (эпсилон)	Ф/м ·	Ф/м ·, Ас/Вм		Ф – Фарад
13	Коэффициент диффузии	D	м <sup>2</sup> /с	м <sup>2</sup> /с, см <sup>2</sup> /с		
14	момент импульса, момент количества движения,	L	Н · с · м	Н · с · м		
15	Момент	M	Н · м	Н · м , кН · м		
16	Скорость вращения /частота вращения	n, f	1/с	1/с, 1/мин		
17	Давление в жидкости	p	Н/м <sup>2</sup> , Па	Мбар, бар	3/3	Па = Pascal



18	Давление как механическое напряжение	$p$	$\text{Н/м}^2$ , Па	$\text{Н/мм}^2$	3/4	
19	Диаметр	$d$	М	См, мм		
20	Динамическая вязкость	$h$ (эта)	Па·с	мПа·с	3/5	
21	Эффективное давление	$p_e$	$\text{Н/м}^2$ , Па	Мбар	3/3	См. 126
22	Напряженность электрического поля	$E$	В/м	В/м		
23	Электрическая емкость	$C$	Ф	Ф, мФ, пФ		Ф=фарад
24	Электрическая проводимость	$s$ (сигма)	С/м	С/м		
25	Электрическая проводимость	$G$	S	S		С = сименс
26	Электрическое напряжение	$U$	В	В, мВ, кВ		
27	Плотность электрического тока	$S$	$\text{А/м}^2$	$\text{А/м}^2$ , $\text{А/см}^2$		
28	Интенсивность электрического тока	$I$	А	А, мА, мкА		
29	Электрическое сопротивление	$R$	Ом	Ом кОм МОм		
30	Электрический заряд	$Q$	К	К А с		К-кулон
31	Масса покоя электрона	$m_e$	Кг	Кг, г		См. Табл. V раздел 9
32	Элементарный заряд	$e$	К	К А.с		
33	Предельное давление	$p_{ult}$	$\text{Н/м}^2$ Па	Мбар		
34	Энергия	$E$	Дж	Дж, кДж, кВт, эВ		Дж= Джоуль
35	Количество энергии /доза излучения	$D$	Дж/к		3/5 а	
36	Ускорение свободного падения	$g$	$\text{м/с}^2$	$\text{м/с}^2$		См. Табл. V раздел 9
37	Площадь	$A$	$\text{м}^2$	$\text{м}^2 \text{см}^2$		
38	Количество соударений на площади	$Z_A$	$1/\text{м}^2 \text{с}^2$	$1/\text{м}^2 \text{с}^2$ / $\text{см}^2 \text{с}^2$		
39	Частота	$f$	Гц	Гц кГц МГц		
40	Проницаемость газа	$Q_{perm}$	$\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}$	$\text{см}^3/\text{м}^2 \cdot \text{д} \cdot \text{бар}$	3/19	д =день (табл. 10.4.4 №. 73№. 103)
41	Газовая постоянная	$R$				
42	Скорость	$v$	м/с	м/с, мм/с, км/ч		
43	Вес (масса)	$m$	Кг	Кг, г, мг	3/6	
44	Вес (усилие)	$G$	Н	Н кН	3/7	
45	Высота	$h$	М	М, см, мм		
46	Подъем	$s$	М	См		См№. 139
47	Количество ионов /доза излучения	$J$	К/кг	К/кг К/г	3/8	
48	Импульс	$p \wedge (b)$	$\text{Н} \cdot \text{с}$	$\text{Н} \cdot \text{с}$		
49	Индукция	$L$	Гн	Гн мГн		Гн=Генри
50	показатель адиабаты	$k$ (каппа)	–	–		$k = c_p / c_v$
51	молярная теплоемкость адиабаты	$C_{mp}$	Дж /моль К	Дж /моль К		
52	удельная теплоемкость	$c_p$	Дж/кгК	Дж /кг К		
53	молярная теплоемкость	$C_{mv}$	Дж /моль К	Дж /кгК		
54	удельная теплоемкость изохора	$c_v$	Дж/кгК	Дж/кгК		
55	Кинематическая вязкость	$\nu$ (ню)	$\text{М}^2/\text{с}$	$\text{мм}^2/\text{с}$ $\text{м}^2/\text{с}$ , $\text{см}^2/\text{с}$	3/9	
56	Кинетическая энергия	$E_k$	Дж	Дж		
57	Сила /усилие	$F$	Н	Н кН МН	3/10	Н= Ньютон
58	Длина	$l$	М	М, см, мм	3/11	
59	Коэффициент линейного расширения	$\alpha$ (альфа)	м/МК	м/МК		
60	Уровень течи	$Q_L$	$\text{Н} \cdot \text{м} / \text{с}$	Мбар.л/с, $\text{см}^3/\text{с}$	3/12	
61	Мощность	$P$	Вт	Вт, кВт, мВт		
62	Напряженность магнитного поля	$H$	А/м	А/м	3/13	
63	Плотность магнитного поля	$B$	Т	Т	3/14	Т=Тесла
64	магнитный поток	$F$ (фи)	Вб, В с	В с	3/15	Вб= Вебер
65	Магнитная индукция	$B$	Т	Т		№63
66	Масса	$m$	Кг	Кг, г, мг	3/6	
67	Массовый расход	$qm$	Кг/с	Кг/с, г/с, кг/ч		



68	Массосодержание	$w_i$	Кг/кг	% , о/о, ppm		ppm = часть миллиона
69	Концентрация массы	$\rho_i$ (rho-i)	Кг/м <sup>3</sup>	Кг/м <sup>3</sup> г/м <sup>3</sup> г/мм <sup>3</sup>		
70	Момент инерции	J	Кг/м <sup>2</sup>	Кг/м <sup>2</sup>		
71	Длина свободного пути	l	М	М, см		
72	Моляльность	$b_i$	Моль/кг	Моль/кг		
73	Молярная газовая постоянная	R				См. Табл. V раздел 9
74	Молярная масса /кол-во массы	M	Дж/мольК Кг/моль	Мббар.л/мольК Кг/моль г/моль		
75	Молярный объем	$V_m$	м <sup>3</sup> /моль	м <sup>3</sup> /моль л/моль		См. Табл. V раздел 9
76	Стандартный молярный объем	$V_{mn}$	м <sup>3</sup> /моль	м <sup>3</sup> /моль л/моль		
77	Масса молекулы	m	Кг	Г		
78	Напряжение (механическое )	s (сигма)	Н/м <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>		
79	Стандартная плотность газа	$\rho_n$ (rho)	Кг/м <sup>3</sup>	Кг/м <sup>3</sup> г/см <sup>3</sup>		См. Табл. V раздел 9
80	Стандартное давление	$p_n$	Н/м <sup>2</sup> Па	Мбар		
81	Стандартный объем	$V_n$	М <sup>3</sup>	М <sup>3</sup> (NTP), см <sup>3</sup>	3/16	
82	Парциальное давление	$p_i$	Н/м <sup>2</sup> Па	Мбар	3/17	
83	Период	T	С	С, мс, мкс		
84	Коэффициент проникновения	P	м <sup>3</sup> ·м/с·м <sup>2</sup> ·бар	См <sup>2</sup> /с·мбар	3/18	
85	Постоянная Планка	h	Дж·с	Дж·с		См. Табл. V раздел 9
86	$\rho_V$ производительность	$q_{pV}$	Н·м/с	Мбар·л/с	3/19	
87	Значение $\rho_V$	$\rho_V$	Н·м	Мбар·л	3/19	
88	Радиус (радиус молекул)	r	М	См, мм, мкм		
89	Плотность заряда	$\rho$ (rho)	К/м <sup>3</sup>	К/м <sup>3</sup> А·с/м <sup>3</sup>		
90	пространственный угол	W omega	sr	sr		sr=стерадиан
91	Относительная атомная масса	$A_T$	—	—	3/20	Безразмерная
92	Относительная молекулярная масса	$M_r$	—	—	3/21	
93	Относительная масса частиц	$M_r$	—	—		
94	Остаточное давление пара	$p_{rd}$	Н/м <sup>2</sup> Па	Мбар		Безразмерная
95	Остаточное давление газа	$p_{rg}$	Н/м <sup>2</sup> Па	Мбар		
96	Остаточное общее давление	$p_r$		Мбар		
97	Число Рейнольдса	Re	—	—		
98	Давление насыщенного пара	$p_s$	Н/м <sup>2</sup> Па	Мбар		
99	Производительность (насоса)	$q_{pV}, Q$	Н·м/с	мбар· л/с		№. 132
100	быстрота действия	S	м <sup>3</sup> /с	м <sup>3</sup> /с, л/с		
101	Натяжение (механическое)	$\sigma, s, t$ $\rho\sigma$ , сиг- нма $\tau_{xy}$ $-\epsilon \cdot m e^{-1}$	Н/м <sup>2</sup>	Н/м <sup>2</sup> Н/мм <sup>2</sup>	3/4	№. 18
102	Удельный заряд электрона		К/кг	К/кг, А·с/кг		Табл. V в разделе 9
103	Удельная газовая постоянная	$R_i$	Дж/кгК	Мбар·л/кгК	3/22	
104	Удельный заряд иона	$e \cdot m^{-1}$	К/кг	К/кг, А·с/кг		
105	Удельное электрическое сопротивление	$\rho$ (rho)	Вт*м	Вт*мм Вт*м <sup>3</sup> /м		
106	Удельный объем	v	м <sup>3</sup> /кг	м <sup>3</sup> /кг см <sup>3</sup> /г		
107	Удельная теплоемкость	c	Дж/кгК	Дж/кгК, Дж/гК	3/23	
108	Постоянная Стефана-Больцмана	s (сигма)	Вт/м <sup>2</sup> К <sup>4</sup>	Вт/м <sup>2</sup> К <sup>4</sup>		Табл. V в разделе 9
109	Количество вещества	n (ню)	Моль	Моль кмоль		
110	Расход вещества	$q_v$	Моль/с	Моль/с		Для вещества "г"
111	Концентрация вещества	$c_i$	Моль/м <sup>3</sup>	Моль/м <sup>3</sup> Моль/л		
112	Скорость соударений	Z	1/с	1/с		
113	Проводимость	C	М <sup>3</sup> /с	М <sup>3</sup> /с л/с		
114	Соппротивление потока	R	с/м <sup>3</sup>	с/м <sup>3</sup> с/л		
115	Кол-во частиц	N	—	—		безразмерная
116	Кол-во частиц в объеме	n	1/м <sup>3</sup>	1/см <sup>3</sup>		



117	Кол-во частиц за период времени	$q_N$	1/с	1/с		№. 120
118	Кол-во проходящих частиц	$j_N$	1/с.м <sup>2</sup>	1/с.см <sup>2</sup> 1/с.м <sup>2</sup>		№121
119	Масса частиц	$m$	Кг	Кг г		
120	Поток частиц	$q_N$	1/с	1/с		№117
121	Плотность потока частиц	$j_N$	1/с.м <sup>2</sup>	1/с.см <sup>2</sup> 1/с.м <sup>2</sup>		№118
122	Температура (термодинамическая)	$T$	К	К, мК		
123	Перепад температур	$D T, DJ$	К	К, °С	3/24	
124	Теплопроводность	$a$	М <sup>2</sup> /С			$a = l \cdot r - 1 \cdot c p$
125	Total pressure	$p_t$	Н/м2, Па	Мбар	3/3	
126	Превышение давления	$p_e$	Н/м2, Па	Мбар	3/3	
127	Давление окружающей среды	$P_{amb}$	Н/м2, Па	Мбар, бар	3/3	
128	Скорость света в вакуумк	$c$	м/с	м/с, км/сч		Табл.V в разделе. 9
129	теплота испарения	$L_d$	Дж	кДж		
130	Вязкость динамическая	$h$ (эта )	Па.с	мПа.с		№. 20
131	Объем	$V$	М <sup>3</sup>	М <sup>3</sup> см <sup>3</sup> л		
132	Объемная производительность (объемный поток)	$q_v$	М <sup>3</sup> /С	М <sup>3</sup> /ч, л/с		
133	Объемная концентрация	$s_i$ сигма	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	л/л, %, о/оо, ppm		ppm = частей миллиона
134	Скорость соударений в объеме	$Z_v$	1/с.м <sup>3</sup>	1/с.м <sup>3</sup> 1/с.см <sup>3</sup>		
135	Количество тепла	$Q$	Дж	Дж, кДж, Вт, кВт	3/25	
136	Теплоемкость	$C$	Дж/К	Дж/К, кДж/К		
137	Теплопроводность	$l$ ламба-да	Вт/К.м	Вт/К.м		
138	Кoeffициент теплопередачи	$a$ (альфа)	Вт/К.м <sup>2</sup>			
139	Длина пути	$s$	М	М, см		
140	Длина волны	$l$ ламба-да	М	Нм	3/11	
141	Угол (плоский)	$a, b, g$	Рад	Рад, °, ', ''	3/26	Рад=радиан
142	Угловое ускорение	$a$ альфа	Рад/с <sup>2</sup>	Рад/с <sup>2</sup>		
143	угловая скорость	$w$ (омега)	Рад/с	Рад/с		
144	КПД	$h$ (эта)	—	—		безразмерная
145	Время	$t$	С	С, мин, ч,		Табл. 10.44
146	Период времени	$t, \Delta t$	С	С, мин, ч,		Табл. 10.44

## 10.3 Комментарии к списку (10.2)

### 3/1 радиоактивность

Ранее использовался Кюри

1 Кюри=3,7.10<sup>10</sup> 1/с=37 1/нс

### 3/2 °С температура Цельсия

Термин градусы Цельсия имеет собственное название в СИ где используется К Кельвин (122) для индикации температуры. Термин градус Цельсия вполне допустим.

### 3/3 давление

Сравните с исправленной версией DIN 1314. Стандартное обозначение применимо к газам, жидкостям, парам. В стандарте DIN 1314 в дополнение к стандартным единицам SI используется бар (1 бар =0,1 МПа= 105 Па), 1 Па=1 Н/м<sup>2</sup>, как 1/10 МПа. Это соответствует стандартам ISO/1000 (11/92). Соответственно мбар, очень полезная в вакуумной техноло-

гии единица измерения, так же применима: 1 мбар=10<sup>2</sup>Па =0,75 торр. Единица измерения торр больше не используется (не допускается).

### Замечание:

Только для измерения абсолютных давлений и расчетов в вакуумной технологии.

В области техники, использующей высокое давление, давление часто основывается на относительном атмосферном давлении (окружающей среды). Согласно DIN 1314 перепад между давлением  $p$  и атмосферным давлением  $p_{amb}$  обозначается как превышение давления  $p_e$ :  $p_e = p - p_{amb}$ . Превышение давления может быть как положительным, так и отрицательным.

### Взаимосвязь:

1 кг/см<sup>2</sup> = 980.665 мбар = **981 мбар**

1 т.атм. (техническая атмосфера) =980.665

мбар= **981 мбар**

1атм. (физическая атмосфера)=1013.25 мбар

= 1013 мбар



1 изб. атм (избыточное давление)=2026.50 мбар = 2 бар  
 1 торр= 1 мм.рт.ст.=1 атм/760  
 33.322 Па = 1.333 мбар  
 1 м вод. ст.= 9806.65 Па=98 мбар  
 1 мм.ст.ст.=133.332 Па= 1.333 мбар = 4/3 мбар.

Давление как механическое напряжение/натяжение обычно выражается в Па и Н/мм<sup>2</sup>.

#### **Взаимосвязь:**

1 Па= 1 Н/м<sup>2</sup>= 10<sup>-6</sup> Н/мм<sup>2</sup>  
 1 кг/см<sup>2</sup> = 98,100 Па= 0.981Н/мм<sup>2</sup>= 0,1 Н/мм<sup>2</sup>  
 1 кг/мм<sup>2</sup> = 9,810,000 Па= 9.81 Н/мм<sup>2</sup> = 10 Н/мм<sup>2</sup>

#### **3/5 динамическая вязкость**

Ранее использовался пуаз:  
 1П=0,1 Па.с=1г/см.с

#### **3/5а доза излучения/ энергии**

Ранее использовался Рад  
 1 рад=1/100 Дж/кг

#### **3/6 вес**

Определен в стандарте DIN 1305. Из-за существовавшей ранее непоследовательности термин «вес» следует использовать только для обозначения массы в результате взвешивания количества товара. Определения удельный вес и удельная сила тяжести больше не используются, а вместо них используют термин плотность.

#### **3/7 килограмм-сила**

См. DIN 1305. больше не используется.  
 1кгс=9,81 Н.

#### **3/8 доза излучения (ионов)**

Ранее использовался Рентген R:  
 1R=2.58·10<sup>-4</sup> К/кг

#### **3/9 кинематическая вязкость**

Ранее использовались Ст (Стоксы):  
 1 Ст=1см<sup>2</sup>/с 1 сСт=1мм<sup>2</sup>/с

#### **3/10: Сила (усилие)**

Ранее использовались дин  
 1 дин = 10<sup>-5</sup> Н

#### **3/11: длина / длина волны**

Единица измерения Ангстрем (А) (для длины волны) больше не используется (таб 4.6).  
 1 А = 10<sup>-8</sup> см= 0.1 нм

#### **3/12: уровень течи**

В DIN 40.046 стр102 для уровня течи используется мбар· дм<sup>3</sup>/с(= мбар· л/с). Обратите внимание, что уровень течи 1мбар·л/с-при 20 °С практически равен 1 см<sup>3</sup>/с (NTP). (см3/17)

#### **3/13: напряженность магнитного поля**

Ранее использовались oersted (Oe).  
 1 Oe = 79.577 A/м

#### **3/14: плотность магнитного потока**

Ранее использовался гаусс (G).  
 1 G = 10<sup>-4</sup> В/м<sup>2</sup>= 10<sup>-4</sup> Т (Т = Тесла)

#### **3/15: магнитная индукция (поток)**

Ранее использовался Максвелл (М).  
 1 М = 10<sup>-8</sup> Вб(Вебер)

#### **3/16: стандартный объем**

Согласно DIN 1343. Обозначение м<sup>3</sup>(NTP) или м<sup>3</sup> хотя и указывается в скобках, не всегда является единицей измерения, а указывает что относится к объему газа в обычных условиях (Т<sub>n</sub> = 273 К, р<sub>n</sub> = 1013 mbar).

#### **3/17: парциальное давление**

Индекс "i" означает, что это парциальное давление "i-того" газа, содержащегося в газовой смеси.

#### **3/18: проницаемость газа**

Коэффициент проницаемости определяется как поток газа м<sup>3</sup>/с (объемный поток рV), который попадает в фиксированную область (м<sup>2</sup>) через толщину (м) при данном перепаде давления (мар). Согласно DIN 53.380 и DIN 7740, часть 1, проницаемость газа (№. 40) определяется как "объем газа, приведенный к 0 °С и 760 торр, который проходит через 1м<sup>2</sup> компонента при данной температуре и перепаде давления в течение дня (= 24 ч)".

#### **3/19: рV производительность /рV значение**

См. DIN 28.400, часть 1.№. 86 и 87 где дается количественное физическое определение только при известной температуре в каждом случае.

#### **3/20: относительная атомная масса**

Ошибочно называли "атомным весом"!

#### **3/21: относительная масса молекул**

Ранее ошибочно назывался "весом молекулы"!

#### **3/22: удельная газовая постоянная**

Как зависящая от массы газовая постоянная для вещества "i". Ri = Rm ( Mi-1; Mi молярная масса (№74) вещества "i". См. DIN 1345.

#### **3/23: удельная теплоемкость**

Так же называется удельным теплом : удельное тепло (теплоемкость) при постоянном давлении: ср. удельное тепло (теплоемкость) при постоянном объеме: сV.

#### **3/24: перепад температур**

Перепад температур указывается в К, но может выражаться и в °С. Обозначение градуса deg не допустимо.



**3/25: количество тепла**

Ранее использовались калории (cal) и килокалории (kcal)  
 $1 \text{ kcal} = 4.2 \text{ кДж}$

**3/26: угол**

1 радиан (рад) равен плоскому углу, который, как некоторый угол окружности радиуса 1 метр, отсекает дугу длиной 1 м. См. DIN 1315 (8/82).

$1^\circ = \pi/180 \text{ рад}$ ;  $1' = 1^\circ/60$ ;  $1'' = 1'/60$ .

$1 \text{ рад} = 360^\circ/2\pi \cdot 60^\circ$

**10.4 Таблицы****10.4.1 Базовые единицы измерения в системе СИ SI**

Базовая единица измерения	Символ	Переменная
Метр	М	Длина
Килограмм	Кг	Масса
Секунда	С	Время
Ампер	А	Эл. Ток
Кельвин	К	Термодин температура
Моль	Моль	кол-во вещества
Кандела	Кд/сд	яркость света

**10.4.2 Единицы измерения в системе СИ с названиями и символами**

название единицы измерения	Переменная	Связь
Кулон	Кол-во электричества или заряд	$1 \text{ К} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$
фарад	Электрическая емкость	$1 \text{ Ф} = 1 \text{ А} \cdot \text{с} / \text{В}$
генри	Индукция	$1 \text{ Гн} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{А}$
Герц	Частота	$1 \text{ Гц} = 1 / \text{с}$
Джоуль	Энергия, работа, кол-во тепла	$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$
Люмен	светимость	$1 \text{ Лм} = \text{кд} \cdot \text{м}^2$
Люкс	освещенность	$1 \text{ лк} = 1 \text{ лм} / \text{м}^2$
Ньютон	сила	$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} / \text{мс}^2$
Ом	электрическое сопротивление,	$1 \text{ Ом} = 1 \text{ В} / \text{А}$
Паскаль	давление механ. напряжение	$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} / \text{м}^2$
стерадиан	угол, плоский угол	$1 \text{ рад} = 1 \text{ м} / \text{м}$
Сименс	электр. проводимость	$1 \text{ С} = 1 / \text{Ом}$
стерадиан	пространственный угол	$1 \text{ ср} = 1 \text{ м}^2 / \text{м}^2$
тесла	магнит. индукция	$1 \text{ Т} = 1 \text{ Вб} / \text{м}^2$
вольт	элект. напряжение или разность потенциалов	$1 \text{ В} = 1 \text{ Вт} / \text{А}$
ватт	мощность, энергия, тепло,	$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж} / \text{с}$
вебер	магнит поток/ индукция	$1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$

**10.4.3 Единицы измерения атомов**

название единицы измерения	Переменная	Символ
атомная единица массы	Масса частицы $1 \text{ а.е.м} = 1/12 \text{ массы } ^{12}\text{C}$	а.е.м
электрон-вольт	Энергия	эВ



#### 10.4.4 Единицы измерения, не указанные в системе СИ с названиями и символами

название единицы измерения	Символ	Связь

День	Д	1д=86400с
Час	Ч	1ч=3600 с
минута	Мин	1 мин=60с
полный угол		
градус	°	2π рад
минута	'	π /180 рад
		π /10800 рад,
		1/60°
секунда	''	π /64800 рад,
		1/60'



## 11 Национальные и международные стандарты и рекомендации, относящиеся к вакуумной технологии

В течение последних 20 лет был принят ряд стандартов и рекомендаций на национальном и международном уровне с учетом современного состояния науки и техники. Необходимо всегда следовать этим рекомендациям и стандартам при работе с вакуумным оборудованием (насосами, вакуумметрами, клапанами и т.п.), системами и установками. Они не только содержат характеристики, применимые в вакуумной технологии, но и включают физические единицы измерения, формулы, замечания, требования по технике безопасности, относящиеся к этой области применения.

Национальные стандарты, в частности стандарт DIN Германии, относящиеся к вакуумной технологии, содержатся в основных стандартах (DIN Стандарты комитета по машиностроению). Рекомендуется следовать международным стандартам:

- a) Международной организации по стандартам ISO - ISO TC112 (вакуумная технология)
- b) Европейского комитета производителей компрессоров и вакуумных насосов PNEUROPO, в частности PNEUROPO C5 (вакуумная технология)
- c) Европейского комитета Стандартизации CEN, в частности технического комитета TC138 (неразрушающий контроль) и Технического комитета TC318.

Содержание документов, разработанных международными организациями, учитываются национальными стандартами, в частности немецкими стандартами и компанией LEYBOLD, что отражено в стандартах DIN: DIN/ISO и DIN/EN. Наиболее важные стандарты перечислены в разделе 11.1.

### 11.1 Национальные и международные стандарты и рекомендации, относящиеся к вакуумной технологии

A) национальные стандарты

DIN	Название	Выпуск
1301-	Единицы измерения:	

8E	Часть 1- названия единиц измерения и их символы Часть 2-обычно используемые доли и части Часть 3 –взаимо-связи единиц измерения, использовавшихся ранее	1993  2/78  6/79
1304	Основные символы Часть 1 – основные символы Часть 2 – символы для метеорологии и геофизики Часть 3 – символы электропитания Часть 5- символы механических потоков Часть 6- символы технологии электрокоммуникаций Часть 7 - символы для метеорологии и геофизики Часть 7 – символы электрических машин	3/94  9/89  3/89  9/89  5/92  1/91
1305	Масса, вес, сила, усилие, нагрузка - определения	1/88
1306	Плотность - определения	6/84
1313	Физические уравнения и переменные, определения	4/78
1314	Давление, основные определения, единицы измерения	2/77
1319	Основные определения технологии измерений Часть 1- основные определения Часть 2 – определения для использования датчиков Часть 3 – определения для неточности измерения; точности датчиков и измерительного оборудования Часть 4- работа с измерительными приборами	1/95  1/80  8/83  12/85
1343	Нормальные условия, исходное состояние	1/90
1345	Термодинамика, основные определения	12/93
1952	Измерения потоков с экранов и сопл	7/82
2402	Трубопроводы номинальные внутренние диаметры, определения, классификация	2/76
3535	Уплотнения для подачи газов	4/94

DIN	Название	Выпуск
8964	Замкнутые контуры систем охлаждения (рефрижераторов) с герметичными и полугерметичными компрессорами Часть 1 – испытания Часть 2 - результаты	E 12/95  3/96 9/89
16005	Датчики избыточного (превышения) давления с эластичными измерительными элементами общего назначения – требования и испытания	2/87
16006	Датчики избыточного (превышения) давления с трубкой Бурдона – Требования безопасности и испытания	2/87
19226	-1 технология контроля	



	и средств измерения, технология управления и регулирования - определения, основные принципы -4 технология контроля и средств измерения, технология управления и регулирования - определения систем управления и регулирования -5 технология контроля и средств измерения, технология управления и регулирования – функциональные определения	2/94  2/94  2/94
25436	Испытания герметичности камер методом абсолютного давления	7/80
28090	Статические уплотнения фланцевых соединений Часть 1 - характеристики уплотнений и методы испытаний Часть 2 – уплотнения-методы испытаний для	9/95  9/95
28400	Вакуумная технология - термины и определения Часть 1 – основные термины, единицы измерения, характеристики переменных и основные принципы Часть 2- вакуумные насосы Часть 3 – вакуумные установки: характеристики переменных и вакуумметры Часть 4 – технология нанесения покрытий в вакууме Часть 5- вакуумная и сублимационная сушка Часть 6- аналитические приборы для технологий поверхности Часть 7 вакуумная металлургия Часть 8 – вакуумные системы, компоненты, принадлежности	Е 7/ 91  5/90  10/80  6/92  3/76  3/81  10/80  7/78  10/80
28401	Вакуумная технология – символы – описание	11/76
28402	Вакуумная технология – переменные символы и единицы измерения – описание	12/76
28403	Вакуумная технология – быстроразъемные соединения, маленькие фланцевые соединения	9/86
<b>DIN</b>	<b>Название</b>	<b>Вы-пуск</b>
28404	Вакуумная технология –фланцы, размеры	10/86
28410	Вакуумная технология – масс-спектрометрический датчик парциального давления, описание, характеристики переменных, условия работы	11/86
28411	Вакуумная технология – допустимые характеристики масс-спектрометрических теческаателей, определения	3/76
28416	Вакуумная технология – калибровка вакуумметров в диапазоне $10^{-3} \dots 10^{-7}$ мбар, общие методы, понижение давления при постоянном потоке	3/76

28417	Вакуумная технология –измерение pV потока (расхода) объеметрическим методом при постоянном давлении	3/76
28418	Вакуумная технология –стандартные методы калибровки вакуумметров методом компарирования с опорным вакуумметром - эталоном Часть 1 – основные принципы Часть 2 - ионизационные вакуумметры Часть 3 - теплопроводные вакуумметры	5/76  9/78  8/80
28426	Вакуумная технология –допустимые характеристики вращательных поршневых насосов Часть 1 - вращательные поршневые и пластинчато-роторные насосы для низкого и среднего вакуума Часть 2 – насосы Рутса для среднего и высоко-го вакуума	
28427	Вакуумная технология –допустимые характеристики диффузионных и пароструйных насосов с давлением паров рабочей жидкости менее 1 мбар	2/83
28428	Вакуумная технология –допустимые характеристики турбомолекулярных насосов	11/78
28429	Вакуумная технология –допустимые характеристики геттерно-ионных насосов	8/85
28430	Вакуумная технология –измерение характеристик эжекторных насосов и компрессоров. Рабочая жидкость – пары воды	11/84
28421	Вакуумная технология –допустимые характеристики водокольцевых насосов	1/87
28432	Вакуумная технология –допустимые характеристики диафрагменных насосов	Е 5/95
53380	Испытания диафрагмы определение проницаемости газа	6/69 Е 10/83
45635	Измерение шума машин: часть 13: компрессоры, вакуумные насосы, турбо и парозжектеры	2/77
55350	Определение точности и статистическая обработка Часть 11 – базовое определение точности Часть 18 определение точности в поверочных сертификатах	8/95  7/87
66038	Таблицы взаимосвязей единиц измерения Торр-мбар, мбар – торр	4/71
	Тезаурус (термины и определения)	1969

#### А) Европейские/ национальные стандарты EN, DIN/EN, CEN

DIN	Название	Вы-
-----	----------	-----



/EN		пуск
EN473	Подготовка и сертификация специалистов по неразрушающему контролю (включая течеискание)	7/93
837-1	Датчики давления часть 1 датчики с трубкой Бурдона, размеры, технология измерения, требования и испытания	2/97
837-2	Датчики давления часть 2 рекомендации по выбору и установке	1/95
837-3	Датчики давления часть 3 емкостные и диафрагменные датчики, размеры, технология измерения, требования и испытания	2/97
1330-8-E	Неразрушающий контроль – определение течеискания - терминология	6/94
1779 E	Неразрушающий контроль – рекомендации по течеисканию- выбор метода	3/95
1338-8-E	Неразрушающий контроль – течеискания - терминология	1994
1518 E	Неразрушающий контроль – определение характеристик для масс-спектрометрического течеискателя	
1593 E	Неразрушающий контроль – пузырьковый метод	12/94
NMP 826	Калибровочные течи	9/95

## В) Международные стандарты ISO , EN/ISO

DIN	Название	Вы-пуск
1000	Единицы измерения SI и рекомендации для использования производных (долей)	11/92
1607/1	Объемные вакуумные насосы. Измерение рабочих характеристик часть 1 – измерение объемного потока – быстроты действия	12/93
1607/1	Объемные вакуумные насосы. Измерение рабочих характеристик часть 2 – измерение предельного давления	11/89
1608/1	Паровые вакуумные насосы. Часть 1 – измерение объемного потока – быстроты действия	12/93
1608/2	Паровые вакуумные насосы. Часть 1 – измерение предельного выпускного давления	12/89
1609	Вакуумная технология Размеры фланцев	3/86
DIN/ISO 2533	Стандартная атмосфера	12/79
2861/1	Быстроразъемные соединения. Размеры. Часть 1 – хомутовые соединения	8/74
2861/2	Быстроразъемные соединения. Размеры. Часть 2 – винтовые соединения	8/80
3529/1	Вакуумная технология – словарь-	12/81

	Часть 1 – основные термины	
3529/2	Вакуумная технология – словарь- Часть 2 – вакуумные насосы и их термины	12/81
3529/3	Вакуумная технология – словарь- Часть 3 – вакуумметры	12/81
3556/1	Характеристики измерений. Часть 1 - магниторазрядные насосы E	1992
3567	Вакуумметры. калибровка методом прямого компарирования с эталонным вакуумметром	2/91
3568	Ионизационные вакуумметры. калибровка методом прямого компарирования с эталонным вакуумметром	2/91
3570/1	Вакуумметры- стандартные методы калибровки Часть 1 – понижение давления при постоянном потоке в диапазоне давлений $10^{-1} \dots 10^{-5}$ Па	2/91
3669	Вакуумные технология – прогреваемые фланцы, размеры Часть 1 фланцы с хомутами	2/86
EN /ISO 4080	Резиновые и пластиковые штуцеры и трубопроводы – определение проницаемости газа	4/95
5167	Измерение потока жидкости с помощью сопла или дросселей	1980
5300	Теплопроводные вакуумметры. калибровка методом прямого компарирования с эталонным вакуумметром	2/91
9803	Переходники и трубопроводы – размеры E	2/93
DIN/ISO 10012	Требования к точности для измерительного оборудования Часть 1 – сертификация систем измерения	8/92

## С) PNEUROP/C5 (6.93)

№/ DIN	Название	Вы-пуск
5607/28427	Вакуумные насосы – характеристики Часть 2 рабочие жидкости	1972
5608/28428	Вакуумные насосы – характеристики Часть 2 турбомолекулярные насосы	1973
5615/28429	Вакуумные насосы – характеристики Часть 3 магниторазрядные насосы	1976
6602/28426	Измерение характеристик эжекторных насосов и компрессоров	5/78
6601/28430	Вакуумные насосы – характеристики Часть 2 насосы с масляным уплотнением и насосы Рутса	1976
6606/28403 28404	Вакуумные фланцы и соединения – размеры	1985
PN5 ASR CC/5	Вакуумные насосы – характеристики рефрижераторов крионасосов	7/89



## 12 Литература

### 1. Обзор, определения и история

K. Diels, R. Jaekel

Leybold Vacuum Handbook, Pergamon Press  
1st Ed. 1966

W. Haeder, E. Gartner

Die gesetzlichen Einheiten in der Technik Beuth-  
Vertrieb GmbH, 5. Aufl. 1980, Berlin 30, Köln,  
Frankfurt (Main)

H. Ebert

Vakuum-Chronik, A documentation on works  
concerning vacuum that were  
published before 1928  
PTB-Bericht ATWD-11, September 1977

M. Dunkel

„Gedenken an Wolfgang Gaede“ Physikalische  
Blätter Nr. 34 (1978), Heft 5, Pages 228-232  
Vakuum-Technik, 27. Jahrgang, No. 4, Pages  
99-101

IUPAP (SUNANCO Commission) Symbols,  
Units etc.

Document 25, 1987

Leybold AG Vademekum, 93 pages, 1988

M. Wutz, H. Adam, W. Walcher

Theory and Practice of Vacuum Technology 5.  
Aufl., 696 pages, 1992, Friedrich Vieweg u.  
Sohn, Braunschweig/ Wiesbaden

A. Guthrie and R. K. Wakerling

Vakuum Equipment and Techniques 264 pages,  
1949, McGraw-Hill, New York/ London/Toronto

D. J. Hucknall

Vacuum Technology and Applications 1st Ed.,  
319 pages, 1991 Butterworth-Heinemann, Ox-  
ford

C. M. van Atta

Vacuum Science and Engineering 459 pages,  
1965, McGraw-Hill

New York/San Francis-  
co/Toronto/London/Sydney

J. M. Lafferty et. al.

Foundations of Vacuum Science and Technolo-  
gy  
704 pages, 1998, Wiley 1998

A. Schubert

Normen und Empfehlungen für die Vakuum-  
Technik

Vakuum in der Praxis, Vol. 3, 1991, 211-217

H. Scharmann

Vakuum – Gestern und Heute

Vakuum in der Praxis, Vol. 2, 1990, 276-281

M. Auwarter

Das Vakuum und W. Gaede

Vakuum-Technik, Vol. 32, 1983, 234-247

J. F. O'Hanlon

A User's Guide to Vacuum Technology 3rd Ed.,  
402 pages, Wiley 1989, New York

G. Reich

Wolfgang Gaede – Einige Gedanken zu seinem  
50. Todestag aus heutiger Sicht Vakuum in der  
Praxis, 7th year, 1995, 136-140

S. German, P. Draht

Handbuch SI Einheiten

Vieweg Braunschweig/Wiesbaden,  
1979, 460 pages

„Gesetz über Einheiten im Me.wesen“ vom 2.  
Juli 1969

„Gesetz zur Änderung des Gesetzes über Ein-  
heiten im Me.wesen“ vom 6. Juli 1973

„Ausführungsverordnungen“ vom 26. Juni 1970

In Vakuum-Technik Vol. 35, 1986:

Th. Mulder

Otto von Guericke Pages 101-110

P. Schneider Zur Entwicklung der Luftpumpen-  
Initiationen und erste Reifebis 1730 Pages 111-  
123

L. Fabel

Physik in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts und  
die vakuumtechnische Entwicklung bis Gaede  
Pages 128-138

H.-B. Burger:

G. Ch. Lichtenberg und die Vakuum technik Pa-  
ges 124-127

G. Reich:

Gaede und seine Zeit

Pages 139-145

H. Adam

Vakuum-Technik in der Zeit nach Gaede (1945  
to the present); Pages 146-147

G. Reich

Die Entwicklung der Gasreibungspumpen von  
Gaede, über Holweck, Siegbahn bis  
zu Pfeleiderer und Becker (mit zahlreichen Litera-  
turangaben)

Vakuum-Technik in der Praxis, Vol. 4, 1992,  
206-213

G. Reich

Carl Hoffman (1844-1910), der Erfinder der  
Drehschieberpumpe Vakuum in der Praxis,

1994, 205-208

Th. Mulder



Blaise Pascal und der Puy de Dome – Große Manner der Vakuum-Technik Vakuum in der Praxis, 1994, 283-289

W. Pupp und H. K. Hartmann  
Vakuum-Technik, Grundlagen und Anwendungen C. Hanser, Munchen, 1991, Wien,

## 2. Вакуумные насосы

### 2.1 Вращательные объемные насосы, конденсаторы

W. Gaede  
Demonstration einer rotierenden Quecksilberpumpe  
Physikalische Zeitschrift, 6, 1905, 758-760

W. Gaede  
Gasballastpumpen  
Zeitschrift für Naturforschung, 2a, 1947, 233-238

W. Armbruster und A. Lorenz  
Das maximale Kompressionsverhältnis und der volumetrische Wirkungsgrad von Vakuumpumpen nach dem Rootsprinzip Vakuum-Technik, 7, 1958, 81-85

W. Armbruster und A. Lorenz  
Die Kombination Rootspumpe-Wasserringpumpe Vakuum-Technik, 7, 1958, 85-88

H. Reylander  
Über die Wasserdampfverträglichkeit von Gasballastpumpen Vakuum-Technik, 7, 1958, 78-81

F. Fauser  
Charakteristik von Pumpsystemen für große Wasserdampfmen gen unter Vakuum und unter Anwendung von Kondensation und Kompression des Wasserdampfes  
1965 Transactions of the Third International Vacuum Congress, Stuttgart, Bd. 2/II, 393-395, Pergamon Press, Oxford 1966

M. Wutz  
Das Abpumpen von Dampfen mit gekühlten Kondensatoren  
Vakuum-Technik, 16, 1967, 53-56

H. Hamacher  
Kennfeldberechnung für Rootspumpen DLR FB 69-88, 1969

H. Hamacher  
Beitrag zur Berechnung des Saugvermögens von Rootspumpen Vakuum-Technik, 19, 1970, 215-221

H. Hamacher

Experimentelle Untersuchungen an Nachkühlern von Rootspumpen Vakuum-Technik, 23, 1974, 129-135

M. Rannow  
Olgedichtete Vakuumpumpen in der Chemie Chemie-Technik, No. 7, 1978, 39-41

H. P. Berges et al.  
TRIVAC-B, ein neues Vakuumpumpen Konzept für universelle Anwendungen  
Vakuum-Technik, 31, 1982, 168-171

H. Lang  
Vakuumpumpen in der chemischen Industrie – Walzkolbenpumpen  
Vakuum-Technik, 1980, 72-82  
H. F. Weber  
Vakuumpumpen in der chemischen Industrie – olgedichtete Rotationsvakuumpumpen Vakuum-Technik, 1980, 98-104

D. Bartels  
Vakuumpumpen in der chemischen Industrie Flüssigkeitsring-akuumpumpen – A Vakuum-Technik, 1980, 131-140

R. W. Adam und C. Dahmlos  
Flüssigkeitsring-akuumpumpen – B Vakuum-Technik, 1980, 141-148

U. Seegebrecht  
Forderung trockener Luft und von gesättigtem Luft-Wasserdampf-Gemisch mit Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen Vakuum-Technik, 1980, 246-252

H.-D. Burger  
Fortschritte beim Betrieb von Walzkolbenpumpen Vakuum-Technik 1983, 140-147

U. Seegebrecht  
Einflu. der Temperatur des Fördermittels auf das Saugvermögen von Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen bei der Forderung von trockener Luft  
Vakuum-Technik, 1985, 10-14

P. Bachmann und H.-P. Berger  
Sicherheitsaspekte beim Einsatz von olgedichteten Drehschiebervakuumpumpen in CVD-Anwendungen Vakuum-Technik, 1987, 41-47

U. Füssel  
Trockenlaufende Vakuumpumpen in der chemischen Industrie Vakuum in der Praxis, 1994, 85-88

L. Ripper



Explosionsschutz-Ma.nahmen an Vakuumpumpen (with numerous references to relevant literature) *Vakuum in der Praxis*, 1994, 91-100

K. P. Muller  
Trockenlaufende Drehschiebervakuumpumpen in einer Vielzahl-Produktionsanlage  
*Vakuum in der Praxis*, 1994, 109-112

F. J. Eckle, W. Jorisch, R. Lachenmann  
Vakuum-Technik im Chemielabor *Vakuum in der Praxis*, 1991, 126-133

P. Bachmann und M. Kuhn  
Einsatz von Vorpumpen im Al-Atzproze.. Erprobung trockenverdichtender Klauenpumpen und olgedichteter Drehschieber  
Vakuumpumpen im Vergleich  
*Vakuum in der Praxis*, 1990, 15 – 21

U. Gottschlich  
Vakuumpumpen im Chemielabor *Vakuum in der Praxis*, 1990, 257-260

M. H. Hablanian  
Aufbau und Eigenschaften verschiedener olfreier Vakuumpumpen für den Grobund Feinvakuumbereich (wichtige Literaturangaben) *Vakuum in der Praxis*, 1990, 96-102

B. W. Wenkebach und J. A. Wickhold  
Vakuumerzeugung mit Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen  
*Vakuum in der Praxis*, 1989, 303-310

U. Gottschlich und W. Jorisch  
Mechanische Vakuumpumpen im Chemieeinsatz *Vakuum in Forschung und Praxis*, 1989, 113-116

W. Jorisch  
Neue Wege bei der Vakuumerzeugung in der chemischen Verfahrenstechnik *Vakuum in der Praxis*, 1995, 115-118

D. Lamprecht  
Trockenlaufende Vakuumpumpen *Vakuum in der Praxis*, 1993, 255-259

P. Deckert et al.  
Die Membranvakuumpumpe – Entwicklung und technischer Stand *Vakuum in der Praxis*, 1993, 165-171

W. Jorisch und U. Gottschlich  
Frischolschmierung – Umlaufschmierung, Gegensätze oder Ergänzung? *Vakuum in der Praxis*, 1992, 115-118

W. Jitschin et al.

Das Saugvermögen von Pumpen: Untersuchung verschiedener Me.verfahren im Grobvakuumbereich  
*Vakuum in Forschung und Praxis*, 7, (1995) 183-193

H.P. Berges and M. Kuhn  
Handling of Particles in Forevacuum pumps *Vacuum*, Vol. 41, 1990, 1828-1832

M. H. Hablanian  
The emerging technologies of oil-free vacuum pumps  
*J. Vac. Sci. Technol. A6* (3), 1988, 1177-1182

E. Zakrzewski, P. L. May and B. S. Emslie  
Developments in vacuum Pumping systems based on mechanical pumps with an oil free swept volume *Vacuum*, 38, 968, 757-760

H. Wycliffe  
Mechanical high-vacuum pumps with an oil-free swept volume *J. Vac. Sci. Technol. A5* (4) 1987, 2608-2611

A. P. Troup and D. Turell  
Dry pumps operating under harsh conditions in the semiconductor industry *J. Vac. Sci. Technol. A7* (3), 1989, 2381-2386

P. Bachmann and M. Kuhn  
Evaluation of dry pumps vs rotary vane pumps in aluminium etching *Vacuum* 41, 1990, 1825-1827

H. P. Berges and D. Gotz  
Oil-free vacuum pumps of compact design *Vacuum*, Vol. 38, 1988, 761-763

## 2.2 Турбомолекулярные насосы

W. Gaede  
Die Molekularluftpumpe  
*Annalen der Physik*, 41, 1913, 337-380

W. Becker  
Eine neue Molekularpumpe  
*Vakuum-Technik*, 7, 1958, 149-152

W. Armbruster  
Vakuumpumpenkombinationen für Labor, Technikum und Produktion *Chemiker-Zeitung / Chemische Apparatur*, 88, 1964, 895-899

W. Becker  
Die Turbo-Molekularpumpe  
*Vakuum-Technik*, 15, 1966, 11-218 и 254-260

R. Frank et al.



Leistungsdaten von Turbo-Molekularpumpen des Typs TURBOVAC mit senkrecht Angeordnetem Axialkompressor Vakuu-Technik, 24, 1975, 78 -85

W. Becker

Eine gegenüberstellende Betrachtung von Diffusionspumpen und Molekularpumpen Ergebnisse europäischer Ultrahochvakuumforschung

Leybold-Heraeus GmbH u. Co., in its own publishing house, Cologne 1968, 41-48

R. Frank, E. Usselmann

Kohlenwasserstofffreier Betrieb mit Turbo-Molekularpumpen des Typs TURBOVAC Vakuu-Technik, 25, 1976, 48-51

R. Frank, E. Usselmann

Magnetgelagerte Turbo-Molekularpumpen des Typs TURBOVAC Vakuu-Technik, 25, 1976, 141-145

H.-H. Henning und G. Knorr

Neue luftgekühlte, lageunabhängige Turbo-Molekular-pumpen für Industrie und Forschung Vakuu-Technik, 30, 1981, 98-101

H.-H. Henning H. P. Caspar

Walzlagerungen in Turbo-Molekularpumpen Vakuu-Technik, 1982, 109-113

E. Kellner et al.

Einsatz von Turbo-Molekular-pumpen bei Auspumpvorgängen im Grob- und Feinvakuumbereich Vakuu-Technik, 1983, 136-139

D. E. Gotz und H.-H. Henning

Neue Turbo-Molekularpumpe für überwiegend industrielle Anwendungen Vakuu-Technik, 1988, 130-135

J. Henning

30 Jahre Turbomolekularpumpe Vakuu-Technik, 1988, 134-141

P. Duval et. al.

Die Spiromolekularpumpe Vakuu-Technik, 1988, 142-148

G. Reich

Berechnung und Messung der Abhängigkeit des Saugvermögens von Turbo-Molekularpumpen von der Gasart Vakuu-Technik, 1989, 3-8

J. Henning

Die Entwicklung der Turbo-Molekularpumpe Vakuu in der Praxis, 1991, 28-30

D. Urban

Moderne Bildrohrenfertigung mit Turbo-Molekularpumpen

Vakuu in der Praxis, 1991, 196-198

O. Ganschow et al.

Zuverlässigkeit von Turbo-Molekularpumpen Vakuu in der Praxis, 1993, 90-96

M. H. Hablanian

Konstruktion und Eigenschaften von turbinenartigen Hochvakuum-pumpen Vakuu in der Praxis, 1994, 20-26

J. H. Fremerey und H.-P. Kabelitz Turbo-Molekularpumpe mit einer neuartigen Magnetlagerung

Vakuu-Technik, 1989, 18-22

H. P. Kabelitz and J.K. Fremerey

Turbomolecular vacuum pumps with a new magnetic bearing concept Vacuum 38, 1988, 673-676

E. Tazioukow et al.

Theoretical and experimental investigation of rarefied gas flow in molecular pumps Vakuu in Forschung und Praxis, 7, 1995, 53-56

## 2.3 рабочие жидкости насосов

W. Gaede

Die Diffusion der Gase durch Quecksilberdampf bei niederen Drucken und die Diffusionspumpe Annalen der Physik, 46, 1915, 357-392

W. Gaede

Die Oldiffusionspumpe Z. techn. Physik, 13, 1932, 210-212

R. Jaeckel, H. G. Noller und H. Kutscher

Die physikalischen Vorgänge in Diffusions- und ampfstrahl-pumpen Vakuu-Technik, 3, 1954, 1-15

W. Bachler und H. G. Noller

Fraktionierung und Entgasung in Oldiffusionspumpen

Z. angew. Physik einschl. Nukleonik, 9, 1957, 612-616

H. G. Noller

Weshalb sind systematische Fehler bei Saugvermögensmessungen besonders gro. für Hochvakuum-pumpen gro.er Leistung ? Vakuu-Technik, 12, 1963, 291-293

W. Bachler und H.-J. Forth

Die wichtigsten Einflu.gro.en bei der Entwicklung von Diffusionspumpen Vakuu-Technik, 13, 1964, 71-75

W. Reichelt

Bemerkungen zur Arbeitsweise moderner Diffusion-pumpen



Vakuum-Technik, 13, 1964, 148-152

H. G. Noller  
Theory of Vacuum Diffusion Pumps Handbook  
of Physics, Vol. 1, Part 6, (pp. 323...419)  
Ed. A. H. Beck, Pergamon  
Press Ltd., London, W.I. (1966)

G. Herklotz  
Enddruckversuche mit Diffusionspumpen hohen  
Saugvermögens und Restgasspektren  
Vakuum-Technik, 20, 1971, 11 – 14

H. G. Noller  
Die Bedeutung von Knudsenzahlen und  
Ähnlichkeitsgesetzen in Diffusions- und Dampf-  
strahlpumpen  
Vakuum-Technik, 26, 1977, 72-78

R. Gosling  
Treibmittelpumpen Vakuum-Technik, 1980, 163-  
168

M. Wutz  
Grundlagen zur Bestimmung der charakteristi-  
schen Daten von Dampfstrahl-Ejektorpumpen  
Vakuum-Technik, 1982, 146-153

H. Bayer  
Dampfstrahlpumpen Vakuum-Technik, 1980,  
169-178

H. Bayer  
Vakuumerzeugung durch  
Dampfstrahl-Vakuumpumpen  
Vakuum in der Praxis, 1989, 127-135

F. Hinrichs  
Aufbau, Betriebsverhalten und  
Regelbarkeit von Dampfstrahl-Vakuumpumpen  
Vakuum in der Praxis, 1991, 102-108

## 2.4 сорбционные насосы

G. Kienel  
Zur Desorption von Gasen in Getter- Ionenpum-  
pen in „Physik und Technik von  
Sorptions- und Desorptionsvorgängen bei niede-  
ren Drucken“ Rudolf A. Lange Verlag, 1963,  
Esch/Taunus,  
266-270

W. Bachler  
Ionen-Zerstauberpumpen, ihre  
Wirkungsweise und Anwendung Leybold-  
Heraeus GmbH u. Co., in its own  
publishing house, Cologne 1966

W. Espe  
Zur Adsorption von Gasen und Dämpfen an Mo-  
lekularsieben

Feinwerktechnik, 70, 1966, 269-273

G. Kienel  
Vakuumerzeugung durch Kondensation und  
durch Sorption  
Chemikerzeitung / Chem. Apparatur 91, 1967,  
83-89 155-161

H. Hoch  
Erzeugung von ohlenwasserstoffreiem Ultra-  
hochvakuum  
Vakuum-Technik, 16, 1967, 156-158

W. Bachler und H. Henning  
Neuere Untersuchungen über den Edelgas-  
Pumpmechanismus von  
Ionenzerstauberpumpen des Diodentyps Proc.  
of the Forth Intern. Vacuum Congress 1968, I.  
365-368, Inst. of Physics, Conference Series No.  
5,  
London

H. Henning  
Der Erinnerungseffekt für Argon bei Trioden-  
Ionenzerstauberpumpen  
Vakuum-Technik, 24, 1975, 37-43

## 2.5 крионасосы и криотехника

R. A. Haefer  
Cryo-Pumping 456 pages, 1989 Oxford Universi-  
ty Press,  
Oxford

H. Frey und R-A. Haefer  
Tiefemperaturtechnologie, 560 pages, VDI-  
Verlag, Dusseldorf, 1981

G. Klipping und W. Mascher  
Vakuumerzeugung durch Kondensation an  
tiefgekuhlten Flächen, I. Kryopumpen Vakuum-  
Technik, 11, 1962, 81-85

W. Bachler, G. Klipping und W. Mascher  
Cryopump System operating down to 2,5 K,  
1962 Trans. Ninth National Vacuum Symposium,  
American Vacuum Society, 216-219, The Mac-  
millan Company, New York

G. Klipping  
Kryotechnik – Experimentieren bei tiefen Tem-  
peraturen  
Chemie-Ingenieur-Technik, 36,  
1964, 430-441

M. Schinkmann  
Messsen und Regeln tiefer Temperaturen, Teil I:  
Thermodynamische Verfahren Me.technik, 81,  
1973, 175-181

G. Schafer, M. Schinkmann





Messsen und Regeln tiefer Temperaturen, Teil II: Elektrische Verfahren, Me.technik,82, 1974, 31-38

R. Frank et al.  
Entwicklung von Refrigeratoren für den Einbau in Kryopumpen  
Vakuum-Technik, 30, 1981, 134-137

J. J. Scheer und J. Visser  
Anwendungen von ryopumpen in der industriellen Vakuumtechnik Vakuum-Technik, 31, 1982, 34-45

P. Duval  
Diffusionspumpen, Turbo-Molekularpumpen oder Kryopumpen ? – Auswahlkriterien für Hochvakuumpumpen Vakuum-Technik, 31, 1982, 99-105

H. Henning und H.-H. Klein  
Pumpen von Helium mit Refrigerator-Kryopumpen Vakuum-Technik, 34, 1985, 181-184

H.-H. Klein et al.  
Einsatz von Kryopumpen in Produktionsanlagen Vakuum-Technik, 34, 1986, 203-211

D. Müller und M. Sydow  
Kryopumpen im Vergleich mit anderen Hochvakuumpumpen  
Vakuum in der Praxis, 2, 1990, 270-274

G. Kiese und G. Vo.  
Kryopumpen mit neuartiger Regenerationstechnik Vakuum in der Praxis, 4, 1992, 189-192

## 2.6 Обратный поток масла

G. Levin  
A quantitative appraisal of the backstreaming of forepump oil vapor J. Vac. Sci. Technol. A 3 (6), 1985, 2212-2213

M. A. Baker and L. Laurenson  
A quartz crystal microbalance holder for low Temperature use in vacuum Vacuum Vol. 17, (12), 647-648, 1967 (Letters to the Editor)

M. A. Baker W. Steckelmacher  
The Measurement of contamination in Vacuum Systems  
Vuoto, scienza e tecnologia, Bd.3, (1/2), 3-17, 1970

J. P. Deville, L. Holland and L. Laurenson  
Measurement of the rate of evaporation of Pump oils

using a crystal vibrator 3rd. Internat. Vac. Congr Stuttgart 153- 160, Pergamon Press, Oxford, 1965

L. Laurenson, S. Hickman and R. G. Livesey  
Rotary pump backstreaming: An analytical appraisal of practical results and the factors affecting them J. Vac. Sci. Technol. A 6 (2), 238-242, 1988

B. D. Power, A. M. I. Mech, E. Crawley and D. J. Crawley  
Sources, Measurement and Control of Backstreaming in Oil Vapour Vacuum Pumps Vacuum, Vol. 4 (4), 415-437, 1957

M. A. Baker  
A cooled quartz crystal microbalance method for measuring diffusion pump backstreaming Journal of Scientific Instruments (Journal of Physics E), Series 2, Volume 1, 774-776, 1968

N. S. Harris  
Diffusion pump back-streaming  
Vacuum, Vol. 27 (9), 519-530, 1977

M. A. Baker  
Vapour and Gas measurements in Vacuum with the Quartz Crystal Microbalance in Vol.1, Proceedings of the ninth Conference on Vacuum Microbalance Techniques, „Progress in Vacuum Microbalance Techniques“

Th. Gast and E. Robens ed.,  
Heyden & Son Ltd., London, New York, Rheine, 1970

M. A. Baker and L. Laurenson  
The use of a quartz crystal microbalance for measuring vapour backstreaming from mechanical pumps Vacuum, Volume 16 (11), 633-637, 1966

R. D. Oswald D. J. Crawley  
A method of measuring back migration of oil through a baffle  
Vacuum, Vol. 16 (11), 623-624, 1966

M. H. Hablanian  
Backstreaming Measurements above Liquid-Nitrogen Traps  
Vac. Sci. Tech., Vol. 6, 265-268, 1969

Z. Hulek, Z. Cespiro, R. Salomonovic, M. Setvak and J. Voltr  
Measurement of oil deposit resulting from backstreaming in a diffusion pump system by proton elastic scattering Vacuum, Vol. 41 (7-9), 1853-1855, 1990

M. H. Hablanian



Elimination of backstreaming from mechanical vacuum pumps J. Vac. Sci. Technol. A5 (4), 1987, 2612-2615

### 3. Сверхвысоковакуумные технологии

G. Kienel  
Probleme und neuere Entwicklungen auf dem Ultrahochvakuum-Gebiet VDI-Zeitschrift, 106, 1964, 777-786

G. Kienel und E. Wanetzky  
Eine mehrmals verwendbare Metallichtung für ausheizbare Ultrahochvakuum-Ventile und Flanschdichtungen Vakuum-Technik, 15, 1966, 59-61

H. G. Noller  
Physikalische und technische Voraussetzungen für die Herstellung und Anwendung von UHV-Geräten "Ergebnisse europäischer Ultrahochvakuum Forschung" LEYBOLD-HERAEUS GmbH u. Co., in its own publishing house, Cologne 1968, 49-58

W. Bachler  
Probleme bei der Erzeugung von Ultrahochvakuum mit modernen Vakuumpumpen. „Ergebnisse europäischer Ultrahochvakuum Forschung“ Leybold-Heraeus GmbH u. Co., in its own publishing house, Cologne 1968, 139-148

P. Readhead, J. P. Hobson und E. V. Kornelsen  
The Physical Basis of Ultrahigh Vacuum Chapman and Hall, London, 1968

E. Bergandt und H. Henning  
Methoden zur Erzeugung von Ultrahochvakuum Vakuum-Technik, 25, 1970, 131-140

H. Wahl  
Das Hochvakuumssystem der CERN am 450 GeV Supersynchrotron und Speichering (SPS) Vakuum in der Praxis, 1989, 43-51

F. Groteluschen  
Das UHV-System bei DESY. 1. Teil Vakuum in der Praxis, 4, 1991, 266-273

D. Trines  
Das Strahlrohrvakuumssystem des Hera-Protonenringes Vakuum in der Praxis, 2, 1992, 91-99

G. Schroder et al.

COSV- eine neue Forschungsanlage mit UHV-Technologie  
Vakuum in der Praxis, 5, 1993, 229-235

W. Jacobi  
Das Vakuumsystem der GSI-Beschleunigeranlage Vakuum in der Praxis, 6, 1994, 273-281

### 4. Проводимости, Фланцы, клапаны и т.п.

M. Knudsen  
Gesetze der Molekularströmung und der inneren Reibungsströmung der Gase durch Rohren Annalen der Physik, 4th issue, 28, 1909, 75-130

P. Clausing  
Über die Strömung sehr verdünnter Gase durch Rohren von beliebiger Länge Annalen der Physik, 5th issue, 12, 1932, 961-989

W. Rollinger  
Die Verwendung von lammerflanschen in der Vakuumtechnik Vakuum-Technik, 13, 1964, 42-45

H. Hoch  
Ausheizbare Verbindungen an Hochvakuum-Apparaturen Vakuum-Technik, 10, 1961, 235-238

W. Bachler und I. Wikberg  
Dual Seal Bakable Section Valves of the CERN Intersection Storage Ring Vacuum, 21, 1971, 457-459

K. Teutenberg  
UHV-Ganzmetallventile großer Nennweite Vakuum-Technik, 21, 1972, 169-174

H. Henning  
The approximate calculation of transmission probabilities Vacuum, 28, 1978, No. 3, Seite 151

G. Kuhn  
Gasströme durch Spalte im Grobvakuum Vakuum-Technik, 33, 1984, 171-175

R. Haberland und B. Vogt  
UHV-Ventil für extrem viele Schließzyklen Vakuum-Technik, 34, 1985, 184-185

A. Sele  
Vakuum-Ventile (VAT) Vakuum in der Praxis, 1, 1989, 206-212



- L. Fikes  
Berechnung von Auspumpkurven mit Hilfe der Analogie von Gasstrom und elektrischem Strom  
Vakuum in der Praxis, 4, 1992, 265-268
- W. Herz  
Zuverlässige Flanschverbindung im Anwendungsgebiet der Tieftemperatur und Vakuumtechnik  
Vakuum-Technik, 29, 1980, 67-68
- 5. измерение низких давлений**
- C. Meinke und G. Reich  
Vermeidung von Fehlmessungen mit dem System McLeod-Kuhlfalle  
Vakuum-Technik, 12, 1963, 79-82
- P. A. Readhead J. P. Hobson  
Total Pressure Measur. below  $10^{-10}$  Torr with Nonmagnetic Ionisation Gauge  
Brit. J. Appl. Phys., 16, 1965, 1555-1556
- C. Meinke und G. Reich  
Comparison of Static and Dynamic Calibration Methods for Ionisation Gauges  
J. Vac. Sci. Techn., 4, 1967, 356-359
- G. Reich und W. Schulz  
Probleme bei der Verwendung von Ionisations-Vakuummetern im Druckbereich oberhalb  $10^{-2}$  Torr  
Proc. of the Fourth Intern. Vacuum Congress, 1968, II. Inst. of Physics Conference Series No. 6, London, 661-665
- G. Reich  
Probleme bei der Messung sehr niedriger Total- und Partialdrucke „Ergebnisse europäischer Ultrahochvakuum Forschung“  
Leybold-Heraeus GmbH u. Co., in its own publishing house, Cologne 1968, 99-106
- A. Barz and P. Kocian  
Extractor Gauge as a Nude System  
J. Vac. Sci. Techn. 7, 1970, 1, 200-203
- U. Beeck and G. Reich  
Comparison of the Pressure Indication of a Bayard-Alpert and an Extractor Gauge  
J. Vac. Sci. and Techn. 9, 1972, 1, 126-128
- U. Beeck  
Untersuchungen über die Druckmessungen mit Glühkathoden-Ionisations-Vakuummetern im Bereich größer als  $10^{-3}$  Torr  
Vakuum-Technik, 22, 1973, 16-20
- G. Reich  
Über die Möglichkeiten der Messung sehr niedriger Drucke.  
Me.technik, 2, 1973, 46-52
- G. Reich  
Spinning rotor viscosity gauge; a transfer standard for the laboratory or an accurate gauge for vacuum process control  
J. Vac. Sci. Technol., 20 (4), 1982, 1148-1152
- G. Reich  
Das Gasreibungs-vakuummeter  
VISCOVAC VM 210  
Vakuum-Technik, 31, 1982, 172-178
- G. Grosse and G. Messer  
Calibration of Vacuum Gauges at Pressures below 10<sup>-9</sup> mbar with a molecular beam method  
Vakuum-Technik, 30, 1981, 226-231
- Chr. Edelmann et al.: Möglichkeiten der Me.bereichserweiterung bei Glühkathoden-Ionisationsmanometern (numerous references to relevant literature)  
Vakuum-Technik, 31, 1982, 2-10
- Chr. Edelmann  
Stand und Entwicklungstendenzen der Totaldruckmessung in der Vakuum-Technik  
Vakuum-Technik, 33, 1984, 162-180
- J. K. Fremerey  
Das Gasreibungsvakuummeter  
Vakuum-Technik, 36, 1987, 205-209
- G. Messer  
Kalibrierung von Vakuummetern  
Vakuum-Technik, 36, 1987, 185-192
- G. Messer und W. Grosse  
Entwicklung der Vakuum-Metrologie in der PTB (numerous references to relevant literature)  
Vakuum-Technik, 36, 1987, 173-184
- G. Reich  
Industrielle Vakuumtechnik  
Vakuum-Technik, 36, 1987, 93-197
- L. Schmidt und E. Eichler  
Die Praxis einer DKD-Kalibrierstelle  
Vakuum-Technik, 36, 1987, 78-82
- C. Kundig  
Vakuummeter für Totaldruck  
Vakuum in der Praxis, 2, 1990, 167-176
- Chr. Edelmann  
Glühkathoden-Ionisationsmanometer für hohe Drucke im Vakuumbereich  
Vakuum in der Praxis, 3, 1991, 290-296
- M. Ruschitzka and W. Jitschin  
Physikalische Grundlagen des Wärmeleitungs-vakuummeters  
Vakuum in der Praxis, 4, 1992, 37-43
- T. Koopmann

Neue Trends in der Vakuum-Technologie Vakuum in der Praxis, 5, 1993, 249-254

Chr. Edelmann

Die Entwicklung der Totaldruckmessung im UHV- und Extremvakuumbereich Vakuum in der Praxis, 6, 1994, 213-219

W. Jitschin

Kalibrierung, Abnahme und Zertifizierung (with numerous references to relevant literature) Vakuum in der Praxis, 6, 1994, 193-204

W. Jitschin

Obere Me.bereichsgrenze von Gluhkathoden-Ionisationsvakuummetern Vakuum in Forschung und Praxis, 7, 1995, 47-48

F. Mertens et al.

Einflu. von Gasadsorbaten auf die Eigenschaften eines Gluhkathoden-Ionisationsvakuummeters mit axialer Emission nach Chen und Suen Vakuum in der Praxis, 7, 1995, 145-149

## **6. мониторинг, регулировка и управление давлением**

K. G. Muller

Betriebsüberwachung, Steuerung und Automatisierung von Vakuumanlagen Chemie-Ingenieur-Technik, 35, 1963, 73-77

G. Kienel

Elektrische Schaltgeräte der Vakuumtechnik Elektro-Technik, 50, 1968, 5-6

A. Bolz, H. Dohmen H.-J. Schubert

Prozessdruckregelung in der Vakuumtechnik Leybold Firmendruckschrift 179.54.01

H. Dohmen

Vakuumdruckmessung und -Regelung in der chemischen Verfahrenstechnik Vakuum in der Praxis, 6, 1994, 113-115

N. Pochheim

Druckregelung in Vakuumsystemen Vakuum in Forschung und Praxis, 7, 1995, 39-46

R. Heinen und W. Schwarz

Druckregelung bei Vakuumprozessen durch umrichter gespeiste Rootspumpen Vakuum-Technik, 35, 1986, 231-236

## **7. масс-спектрометр и анализ газов при низких давлениях**

H. Hoch

Total- und Partialdruckmessungen bei Drucken zwischen  $2 \cdot 10^{-10}$  und  $2 \cdot 10^{-2}$  Torr Vakuum-Technik, 16, 1967, 8-13

H. Junge

Partialdruckmessung und Partialdruckmessgeräte G-I-T May 1967, 389-394 and June 1967, 533-538

A. Kluge

Ein neues Quadrupolmassenspektrometer mit massenunabhängiger Empfindlichkeit Vakuum-Technik, 23, 1974, 168-171

S. Burzynski

Microprocessor controlled quadrupole mass spectrometer Vacuum, 32, 1982, 163-168

W. Große Bley

Quantitative Gasanalyse mit dem Quadrupol Massenspektrometer Vakuum-Technik, 38, 1989, 9-17

A. J. B. Robertson

Mass Spectrometry Methuen & Co, Ltd., London, 1954

C. Brune und H. Voshage

Massenspektrometrie Karl Thieme Verlag, München, 1964

A. Cornu and R. Massot

Compilation of Mass Spectral Data Heyden and Son Ltd., London, 1966

P. Dawson

Quadrupole Mass Spectroscopy Elsevier, Amsterdam, 1976

J. Backus

Chap. 11 in "Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields" National Nuclear Energy Series, Div. I, Vol. 5, McGraw-Hill Book Company Inc., New York, 1949

J. Backus

University of California Radiation Laboratory Report, RL 20.6.36, Mar. 1945.

## **8. Течи и течеискание**



## 8.1 масс-спектрометрический течеискатель

G. Kienel  
Lecksuche an Vakuumanlagen auf elektrischem Wege  
Elektrotechnik, 49, 1967, 592-594

U. Beeck  
Möglichkeiten und Grenzen der automatischen Lecksuche im Bereich unter 10<sup>-8</sup> Torr. l/s  
Vakuum-Technik, 23, 1974, 77-80

Lecksuche an Chemieanlagen  
Dechema Monographien (Ed. H. E. Buhler and K. Steiger), Vol. 89, Verlag Chemie, Weinheim / New York

W. Jansen  
Grundlagen der Dichtheitsprüfung mit Hilfe von Testgasen Vakuum-Technik, 29, 1980, 105-113

K. Paasche  
Lecksuche an Chemieanlagen  
Vakuum-Technik, 29, 1980, 227-231

H. B. Burger  
Lecksuche an Chemieanlagen mit He- Massenspektrometer-Lecksuchern Vakuum-Technik, 29, 1980, 232-245

Chr. Falland  
Ein neuer Universal Lecksucher mit luftgekühlter Turbo-Molekularpumpe Vakuum-Technik, 29, 1980, 205-208

W. Jansen  
Grundlagen der Dichtheitsprüfung mit Hilfe von technischen Gasen Vakuum-Technik, 29, 1980, 105-113

H. Mennenga  
Dichtheitsprüfung von Kleinteilen Vakuum-Technik, 29, 1980, 195-200

Chr. Falland  
Entwicklung von He-Lecksuchtechniken für UHV-Systeme großer Beschleuniger und Speicherringe Vakuum-Technik, 30, 1981, 41-44

W. Engelhardt et al.  
Lecksuchanlagen in der Industrie Vakuum-Technik, 33, 1984, 238-241

G. Sanger et al.  
Über die Lecksuche bei Raumfahrzeugen Vakuum-Technik, 33, 1984, 42-47

W. Jitschin et al.

He-Diffusionslecks als sekundäre Normale für den Gasdurchflu. Vakuum-Technik, 36, 1987, 230-233

W. Große Bley  
Moderne He-Leckdetektoren unterschiedlicher Prinzipien im praktischen Einsatz  
Vakuum in der Praxis, 1, 1989, 201-205

H. D. Burger  
Lecksucher (with references to relevant literature)  
Vakuum in der Praxis, 2, 1990, 56-58

W. Fuhrmann  
Einführung in die industrielle Dichtheitsprüftechnik Vakuum in der Praxis, 3, 1991, 188-195

W. Fuhrmann  
Industrielle Dichtheitsprüfung – ohne Testgas nach dem Massenspektrometrierverfahren  
Vakuum in Forschung und Praxis, 7, 1995, 179 - 182

## 8.2 галогеновые течеискатели

H. Moesta und P. Schuff  
Über den thermionischen Halogendetektor Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie, Bd. 69, 895-900, 1965  
Verlag Chemie, GmbH, Weinheim, Bergstraße

J. C. Leh and Chih-shun Lu  
US Patent Nr. 3,751,968  
Solid State Sensor

## 9 измерение и контроль толщины пленок

G. Z. Sauerbrey  
Phys. Verhandl. 8, 113, 1957

G. Z. Sauerbrey  
Verwendung von Schwingquarzen zur Wagung dünner Schichten und zur Mikrowagung Zeitschrift für Physik 155, 206-222, 1959

L. Holland, L. Laurensen and J. P. Deville Use of a Quartz Crystal Vibrator in Vacuum Distillation Investigations  
Nature, 206 (4987), 883-885, 1965



- R. Bechmann  
Über die Temperaturabhängigkeit der Frequenz von AT- und BT-Quarzresonatoren Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik, Bd. 9, 513-518, 1955
- K. H. Behrndt and R. W. Love  
Automatic control of Film Deposition Rate with the crystal oscillator for preparation of alloy films. Vacuum 12, 1-9, 1962
- P. Lostis  
Automatic Control of Film Deposition Rate with the Crystal Oscillator for Preparation of Alloy Films. Rev. Opt. 38, 1 (1959)
- K. H. Behrndt  
Longterm operation of crystal oscillators in thin film deposition J. Vac. Sci. Technol. 8, 622 (1971)
- L. Wimmer, S. Hertl, J. Hemetsberger and E. Benes  
New method of measuring vibration amplitudes of quartz crystals. Rev. Sci. Instruments 55 (4), 608, 1984
- P. J. Cumpson and M. P. Seah  
Meas. Sci. Technol., 1, 548, 1990
- J. G. Miller and D. I. Bolef  
Sensitivity Enhancement by the use of Acoustic Resonators in cw Ultrasonic Spectroscopy. J. Appl. Phys. 39, 4589, (1968)
- J. G. Miller and D. I. Bolef  
Acoustic Wave Analysis of the Operation of Quartz Crystal Film Thickness Monitors. J. Appl. Phys. 39, 5815, (1968)
- C. Lu and O. Lewis  
Investigation of Film thickness determination by oscillating quartz resonators with large mass load. J. Appl. Phys. 43, 4385 (1972)
- C. Lu  
Mass determination with piezoelectric quartz crystal resonators. J. Vac. Sci. Technol. Vol. 12 (1), 581-582, 1975
- A. Wajid  
U.S. Patent No. 5,055,112,642 (May 12, 1992)
- C. Hurd  
U.S. Patent No. 5,117,192 (May 26, 1992)
- E. Benes  
Improved Quartz Crystal Microbalance Technique J. Appl. Phys. 56, (3), 608-626 (1984)
- C. J. Wilson  
Vibration modes of AT-cut convex quartz resonators. J. Phys. d 7, 2449, (1974)
- H. F. Tiersten R. C. Smythe  
An analysis of contoured crystal resonators operating in overtones of coupled thickness shear and thickness twist. J. Acoustic Soc. Am. 65, (6) 1455, 1979
- R. E. Bennett, C. Rutkieski and L. A. Taylor  
Proceedings of the Thirteenth Annual Symposium on Frequency Control, 479, 1959
- Chih-shun Lu  
Improving the accuracy of Quartz crystal monitors Research/Development, Vol. 25, 45-50, 1974, Technical Publishing Company
- A. Wajid  
Improving the accuracy of a quartz crystal microbalance with automatic determination of acoustic impedance ratio. Rev. Sci. Instruments, Vol. 62 (8), 2026- 2033, 1991
- D. Graham and R. C. Lanthrop  
The Synthesis of Optimum Transient Response: Criteria and Standard Forms Transactions IEEE, Vol. 72 pt. II, Nov. 1953
- A. M. Lopez, J. A. Miller, C. L. Smith and P. W. Murrill  
Tuning Controllers with Error-Integral Criteria Instrumentation Technology, Nov. 1969
- C. L. Smith and P. W. Murrill  
A More Precise Method for Tuning Controllers ISA Journal, May 1966
- G. H. Cohen and G. A. Coon  
Theoretical considerations of Retarded Control Taylor Technical Data Sheet Taylor Instrument Companies, Rochester, New York
- J. G. Ziegler and N. B. Nichols  
Optimum Settings for Automatic Controllers Taylor Technical Data Sheet No. TDS 10A100, Taylor Instrument Companies, Rochester, New York
- C. Lu and A. W. Czanderna  
Application of Piezoelectric Quartz Crystal Microbalances (Vol.7 of: Methodes and Phenomena, Their Applications in Science and Technology) Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokio, 1984



G. Simmons and H. Wang  
Single Crystal Elastic Constants and Calculated  
Aggregate Properties –  
A Handbook The MIT Press, Cambridge, Mas-  
sachusetts,  
1971

C. D. Stockbridge  
in Vol. 5 "Vacuum microbalance Techniques" K.  
Behrndt, editor, Plenum Press, Inc., New York,  
1966

S. Sotier  
Schwingquarz-Schichtdickenmessung  
Vakuum in der Praxis 1992, 182-188

## **10. материалы и обработка материа- лов**

W. Espe  
Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik  
Vol. 1 1959, Vol. 2 1960, Vol. 3 1961, VEB  
Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin

W. Espe  
Werkstoffe für trennbare metallische Verbindun-  
gen  
der Ultrahochvakuumtechnik  
Feinwerktechnik, 68, 1964, 131-140

W. Espe  
Synthetische Zeolithe und ihre Verwendung in  
der Hochvakuumtechnik Experimentelle Technik  
der Physik, XII, 1964, 293-308

H. Adam  
Allgemeiner Überblick über die Werkstoffe der  
Vakuumtechnik und deren Auswahl Haus der  
Technik Vortragsveröffentlichungen "Werkstoffe  
und Werkstoffverbindungen in der Vakuumtech-  
nik" H. 172, Vulkan- Verlag, Dr. W. Classen, Es-  
sen, 1968, 4 – 13

K. Verfu.  
Bessere Oberflächenvergotung durch Elektropo-  
lieren – am Beispiel der Vakuum- Technik  
VDI-Berichte, 183, 1972, 29-34

K. Verfu.  
Schweißen und Hartloten  
Haus der Technik, Vortragsveröffentlichungen  
"Werkstoffe und Werkstoffverbindungen  
in der Vakuumtechnik", H. 172  
Vulkan-Verlag Dr. W. Classen, Essen, 1968,  
Seiten 39 -49

Chr. Edelmann  
Gasabgabe von Festkörpern im Vakuum Vaku-  
um-Technik, 38, 1989, 223-243

R. Fritsch

Besonderheiten vakuumdichteter  
Schweißverbindungen  
Vakuum-Technik, 38, 1989, 94-102

H. Henning  
Vakuumgerechte Werkstoffe und Verbindungs-  
technik, Part 1  
Vakuum in der Praxis, 2, 1990, 30-34

R. Fritsch  
Vakuumgerechte Werkstoffe und Verbindungs-  
technik, Part 2  
Vakuum in der Praxis, 2, 1990, 104-112

M. Muhlloff  
Vakuumgerechte Werkstoffe und Verbindungs-  
technik, Part 3  
Vakuum in der Praxis, 2, 1990, 179-184

## **11. Словари**

F. Weber  
Elsevier's Dictionary of High Vacuum Science  
and Technology (German, English, French,  
Spanish, Italian, Russian)  
Elsevier Verlag 1968

Hurrle / Jablonski / Roth  
Technical Dictionary of Vacuum Physics  
and Vacuum Technology (German, English,  
French, Russian) Pergamon Press Verlag, Ox-  
ford, 1972





## ООО «ХайВак»

ИНН: 9719005357 КПП: 771901001 ОГРН: 1207700241176 ОКПО 44863624

E-mail: [info@hv-e.ru](mailto:info@hv-e.ru) Тел.: +7 (499) 397-73-13 Сайт: [hv-e.ru](http://hv-e.ru)

---



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



ООО «ХайВак»

Официальный представитель

Leybold GmbH в России

105188, Москва, ул. Буракова д.27

тел. (499) 397-73-13

[info@hv-e.ru](mailto:info@hv-e.ru)

[www.hv-e.ru](http://www.hv-e.ru)

