а также более дешева. Преимущества холодной камеры связаны с тем, что при температуре жидкого He, равной 4,2 К, все газы, кроме He и H_2, имеют равновесное давление насыщения менее 10^{-14} Па. Благодаря интенсивной собственной откачке холодную камеру можно сделать очень малого диаметра, несмотря на значительное уменьшение проводимости в такой конфигурации.

4.4. РЕГИСТРАЦИЯ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

4.4.1. Методы измерения газовых потоков

Один из важнейших параметров вакуумных систем – давление, которое определяется балансом газовых потоков, поступающих в вакуумную систему и удаляемых из нее. Поэтому при проведении различных процессов в вакууме важно знать поток откачиваемых газов. Так, предельное остаточное давление в вакуумной системе при непрерывной откачке определяется собственным газовыделением элементов системы, которое и создает поток откачиваемых газов. В изолированной вакуумной системе (отключенной от насоса) время сохранения достигнутого при откачке давления также зависит от газовыделения и, следовательно, полностью определяется потоком поступающего в систему газа.

Данные о газовом потоке необходимы при определении характеристик вакуумных насосов, измерении проводимостей вакуумных элементов, исследовании газовыделения конструкционных материалов и т. д.

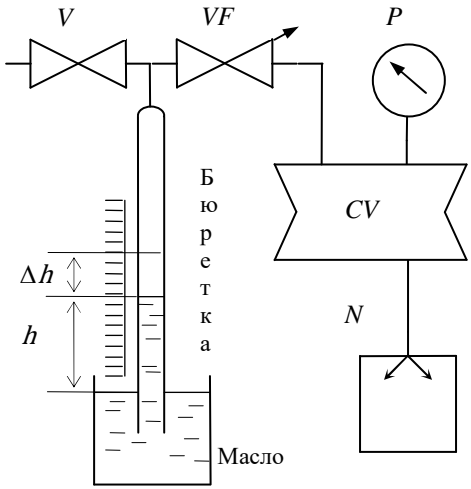
Поток газа характеризует количество переносимого вещества за промежуток времени. В соответствии с уравнением для потока (1.10) можно рассмотреть случаи стационарного и нестационарного течения газа:

$$Q = \frac{\mathrm{d}(pV)}{\mathrm{d}t} = p\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} + V\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t},$$

в соответствии с чем существует два метода для измерения газовых потоков: *постоянного давления* и *постоянного объема*.

В методе постоянного давления измерение потока осуществляется по скорости изменения объема, занимаемого откачиваемым газом. На рис. 4.14 показана схема измерения потока таким

методом, использующая жидкостную бюретку для регистрации изменения объема газа.



Р и с. 4.14. Схема измерения газового потока методом постоянного давления

В вакуумную систему, состоящую из камеры CV, насоса N и вакуумметра P, газовый поток подается через регулируемый натекатель VF. Клапан V позволяет переключать напуск газа либо из атмосферы, либо, когда клапан закрыт, из объема бюретки. В последнем случае возможно произвести измерение величины поступающего газового потока. Давление в измерительном объеме бюретки

$$p_{\text{изм}} = p_{\text{атм}} - \rho g h ,$$

где ρ – плотность жидкости и h – высота столба жидкости в бюретке. Если выполняется условие, что $p_{\text{атм}} >> \rho g h$, то можно считать $p_{\text{изм}} \approx \text{const}$ и требование постоянства давления выполняется. Тогда газовый поток

$$Q = p_{\text{изм}} \frac{\Delta V}{\Delta t} = K_S p_{\text{изм}} \frac{\Delta h}{\Delta t} ,$$

где Δh и ΔV – изменения уровня жидкости и величины объема измерительного цилиндра бюретки за время Δt; K_s – постоянная бюретки ($\Delta V = K_s \cdot \Delta h$). Таким образом, по скорости поднятия уровня жидкости в бюретке определяется величина газового потока.

Примером использования описанного метода постоянного давления является определение эффективной быстроты откачки вакуумной камеры по известному значению газового потока:

$$S_{\text{эф}} = \frac{Q}{p},$$

где p – давление, измеренное в камере вакуумметром.

В методе постоянного объема измерение потока осуществляется по скорости изменения давления. При измерении потока методом постоянного объема вакуумная камера с источником потока газа и вакуумметром изолируется (клапаном) от насоса на фиксированное время Δt. Вследствие поступления в камеру стационарного потока Q давление увеличится на Δp, а количество газа возрастет на ΔpV, где V – объем изолированной части вакуумной системы. Тогда измеряемый поток

$$Q = V\frac{\Delta p}{\Delta t}.$$

Для надежного измерения потока методом постоянного объема (иначе – *метод накопления*) тепловое газовыделение сорбированных газов $Q_{\text{Г}}$ должно быть мало по сравнению с измеряемым газовым потоком. В противном случае будет наблюдаться нелинейное повышение давления (рис. 4.15).

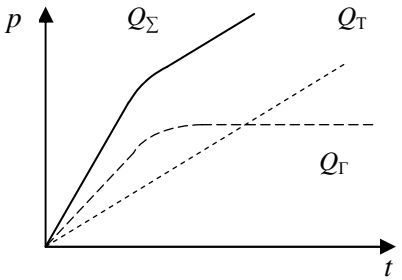


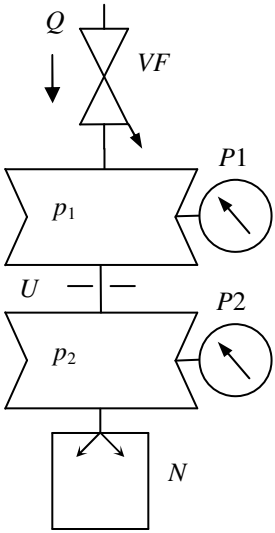
Рис 4.15. Динамика роста давления, связанного с различными источниками газа в изолированной вакуумной камере:
$Q_{\text{Г}}$ – газовыделение
$Q_{\text{Т}}$ – входящий поток
Q_{Σ} – суммарный поток

Погрешность измерения потока разреженного газа обычно составляет от –50 до +100 % и во многом обусловлена сорбционными процессами и погрешностью определения расчетных величин давления.

Другая возможность определения стационарного газового потока следует из рассмотрения выражения для проводимости (1.12):

$$Q = U\left(p_1 - p_2\right).$$

Уравнение может быть использовано для организации измерений стационарных газовых потоков по перепаду давления на вакуумном элементе известной проводимости U по схеме, аналогичной применяемой для градуировки вакуумметров (рис. 4.16). Регулировка потока газа может осуществляться с помощью натекателя *VF*. Давления p_1 и p_2 измеряются соответствующими вакуумметрами.



Р и с. 4.16. схема измерения стационарного газового потока методом калиброванного сопротивления и двух вакуумметров

Метод измерения потока с помощью калиброванного сопротивления нашел широкое распространение в промышленности и лабораторной практике. Производительность насоса или газовый поток, проходящий через его входной патрубок, рассчитывается по уравнению (1.12), а быстрота откачки насоса

$$S = \frac{Q}{p_2} = \frac{U(p_1 - p_2)}{p_2}.$$

В качестве калиброванного вакуумного сопротивления часто используют тонкие перегородки с отверстиями (диафрагмы). Для расширения пределов измерения проводимость диафрагмы можно изменять непрерывно, например с помощью конструкции ирисовой

диафрагмы, применяемой в фотоаппаратах, или ступенчато, используя поворотные диски с отверстиями различных диаметров.

Метод калиброванного сопротивления можно видоизменить при использовании насоса с высокой быстротой действия. В этом случае $p_1 \gg p_2$, и, зная значение проводимости и измеряя установившееся давление p_1, поток газа можно определить по формуле $Q = p_1 U$.

Общий недостаток методов, использующих калиброванное сопротивление, состоит в том, что калиброванное сопротивление остается постоянным только до тех пор, пока течение газа происходит в молекулярном режиме. В молекулярно-вязкостном и вязкостном режимах течения газов проводимость элементов зависит от давления, и оценка потока становится более сложной.

4.4.2. Техника течеискания

В любой вакуумной системе всегда имеется ряд участков, наименее надежных в отношении *герметичности*, т.е. исключающих проникновение через них газообразных (или жидких) веществ. Наличие *течи* в виде канала или пористого участка в элементах конструкций системы проявляется в невозможности достижения предельного разрежения, на которое рассчитана данная вакуумная система. **При всей тщательности изготовления вакуумных систем в целом невозможно достигнуть абсолютного отсутствия течей**. Можно добиться лишь того, чтобы суммарное *натекание*, являющееся проникновением газа из атмосферы в вакуумную систему, оставалось в допустимых пределах, но для этого необходима количественная оценка течей. Собственно *течеисканием* называется процесс обнаружения течей.

Экспериментальное определение величины суммарного потока натекания может быть проведено методом постоянного объема при отключении насосов от вакуумной системы. При этом в системе наблюдается рост давления, вызванный поступающими в систему потоками натекания и газовыделения (рис. 4.15). Анализ получаемой таким образом зависимости $p(t)$ позволяет не только установить наличие газовыделения и натекания (нелинейная и линейная части зависимости), но и оценить их величины.

Если сначала давление газа растет быстро, а затем достигает предела, то причиной плохого вакуума является, вероятнее всего, выделение газа со стенок системы или присутствие загрязняющих веществ с высоким давлением паров. Если же давление продолжает непрерывно расти, то в этом случае следует искать в системе течь.

Оценку степени герметичности системы можно получить по темпу нарастания давления $\mathrm{d}p/\mathrm{d}t$ в изолированном объеме системы V:

$$Q_{\text{Т}} = V\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}.$$

Суммарное натекание можно считать допустимым, если требуемое давление в вакуумной системе обеспечено и при наличии течи. В этом случае эффективная быстрота откачки насоса $S_{\text{ЭФ}}$ должна быть подобрана так, чтобы $Q_{\text{Т}} \le S_{\text{ЭФ}} \cdot p$.

Для определения места течей разработано несколько методов течеискания. Наиболее широкое распространение получил *метод пробного газа*. После получения возможного вакуума в испытуемом объекте место, проверяемое на наличие течи, обдувается пробным газом, который вместо воздуха начинает поступать в этот объект. Изменение состава остаточных газов в вакуумной системе можно зарегистрировать с помощью вакуумметра, показания которого зависят от рода газа, или масс-спектрометра, настроенного на пробный газ. Для предотвращения повышения давления проверяемый объект должен находиться под непрерывной откачкой.

В вакуумной системе с негерметичной оболочкой разность показаний вакуумметра по воздуху $\alpha_{\text{В}}$ и пробному газу $\alpha_{\text{П}}$ при изменении давлений пробного газа и воздуха $\Delta\alpha = \alpha_{\text{П}} - \alpha_{\text{В}}$:

$$\Delta\alpha = \frac{Q_{\text{П}}}{K_{\text{П}}S_{\text{П}}} - \frac{Q_{\text{В}}}{K_{\text{В}}S_{\text{В}}} = \frac{Q_{\text{В}}}{K_{\text{В}}S_{\text{В}}}\left(C_{\text{П}}\frac{Q_{\text{П}}S_{\text{В}}}{Q_{\text{В}}S_{\text{П}}} - 1\right),$$

где $Q_{\text{В}}$ и $Q_{\text{П}}$ – потоки воздуха и пробного газа; $S_{\text{В}}$ и $S_{\text{П}}$ – быстрота откачки объема по воздуху и пробному газу; $K_{\text{В}}$ и $K_{\text{П}}$ – чувствительности вакуумметра по воздуху и пробному газу; $C_{\text{П}}$ – относительная чувствительность к пробному газу.

Для получения максимального сигнала необходимо выбирать пробный газ так, чтобы произведение $C_{\text{П}}(Q_{\text{П}}S_{\text{В}})/(Q_{\text{В}}S_{\text{П}})$ максимально возможно отличалось от единицы. Так, при определении

герметичности вакуумной системы, откачиваемой пароструйным насосом, замещение воздуха на аргон или гелий вызывает 50-процентное увеличение показаний ионизационного вакуумметра. Для того чтобы соотношение $S_В/S_П$ также сильно отличалось от единицы, нужно использовать насосы, быстрота откачки которых зависит от рода газа. Например, адсорбционный насос, охлаждаемый жидким азотом, значительно хуже, чем воздух, откачивает гелий, неон и водород.

При использовании масс-спектрометра для регистрации пробного газа учитывается разность показаний от пробного газа и фонового сигнала, определяемого парциальным давлением пробного газа в воздухе $\Delta\alpha = \alpha_П - \alpha_Ф$. Разность показаний будет равна

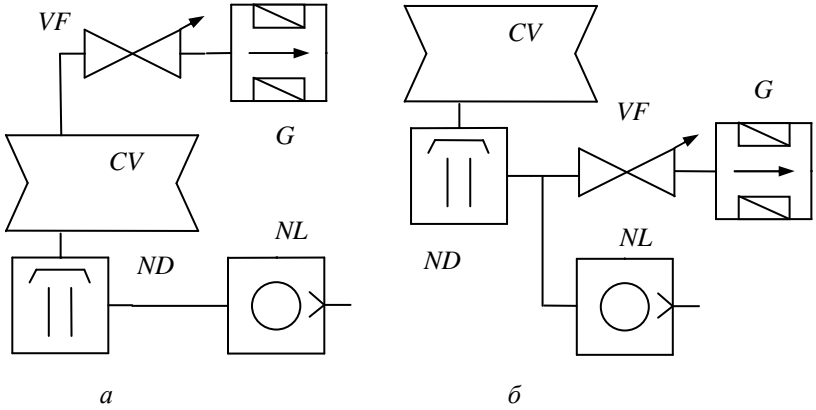
$$\Delta\alpha = \frac{Q_П - Q_Ф}{K_П S_П},$$

где $Q_Ф$ – фоновый поток пробного газа, содержащегося в атмосферном воздухе. Масс-спектрометрический метод обладает самой высокой чувствительностью. Минимальные течи, которые можно обнаружить масс-спектрометром, равны 10^{-14} м^3·Па/с.

Основным пробным газом, применяемым при течеискании, является He. Благодаря химической инертности он безопасен в работе, малая молекулярная масса обеспечивает его хорошее проникновение через течи, а низкая адсорбируемость уменьшает время испытаний. Однако возможности такого способа течеискания имеют ограничения, связанные с необходимостью получения в системе вакуума, достаточного для нормальной работы масс-спектрометра ($< 10^{-2}$ Па), что не всегда возможно при начальной сборке системы.

Масс-спектрометрический метод успешно применяется в случае подключения к вакуумным системам **специальных приборов для обнаружения течей** – *течеискателей*. В их составе присутствует собственная автономная система откачки для обеспечения рабочих условий в масс-спектрометрической камере. Течеискатель может непосредственно подключаться к испытуемому объекту вакуумной системы (рис. 4.17, *а*), когда объем отбираемого в течеискатель газа достаточен для создания в анализаторе предельно допустимого давления (максимальная чувствительность). При подключении по второй схеме (рис. 4.17, *б*) обеспечиваются максимальный отбор газа в течеискатель и наиболее высокая чувствительность с учетом

повышения давления отбираемого газа, в том числе и пробного, на выходе насоса.



Р и с. 4.17. Схемы испытаний вакуумных систем на герметичность с помощью автономного гелиевого течеискателя:
G – течеискатель; *CV* – вакуумная камера; *ND* – насос диффузионный; *NL* – насос механический; *VF* – клапан-натекатель

Анализирующая камера промышленного течеискателя аналогична конструкции магнитного статического анализатора. Однако датчик анализатора настраивается только на пробный газ (см. 3.3.2). При этом входная и выходная щели могут быть расширены, что увеличивает чувствительность анализатора. Этот способ хорошо применим для гелия, не имеющего в составе воздуха веществ с близкими массовыми числами.

Для предварительной градуировки течеискателя может применяться *гелиевая течь*, представляющая собой наполненную гелием стеклянную трубку с кварцевой стенкой, через которую происходит медленная диффузия He. Минимальные течи, регистрируемые течеискателем, 10^{-14} Па.

При использовании метода пробного газа необходимо учитывать инерционность испытаний. Время, в течение которого достигается установившийся сигнал, в 5–6 раз больше постоянной времени откачки $\tau = V/S$.

Вместо пробных газов в условиях низкого вакуума иногда пользуются пробными жидкостями: спиртом, эфиром, бензином, ацетоном и т.д. Большая инерционность испытаний, связанная с временем проникновения жидкости через тонкие капилляры, является существенным недостатком применения пробных жидкостей. При радиусе капилляра 10^{-4} см время проникновения пробной жидкости достигает нескольких часов, возрастая пропорционально уменьшению радиуса капилляра. Применение пробных жидкостей и испытаний при высоких давлениях целесообразно для индикации грубых течей.