

Работа 2.3.1

Получение и измерение вакуума

Цель работы: 1) измерение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки; 2) определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и по улучшению вакуума.

В работе используются: вакуумная установка с манометрами: масляным, термомпарным и ионизационным.

По степени разрежения вакуумные установки принято делить на три класса: 1) низковакуумные — до 10^{-2} – 10^{-3} торр; 2) высоковакуумные — 10^{-4} – 10^{-7} торр; 3) установки сверхвысокого вакуума — 10^{-8} – 10^{-11} торр. В данной работе изучаются традиционные методы откачки механическим форвакуумным насосом до давления 10^{-2} торр и диффузионным масляным насосом до давления 10^{-5} торр, а также методы измерения вакуума в этом диапазоне.

Экспериментальная установка. Установка изготовлена из стекла и состоит из форвакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термомпарных манометров (M_1 и M_2), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов K_1 , K_2 , ..., K_6 (рис. 1). Кроме того, в состав установки входят: вариатор (автотрансформатор с регулируемым выходным напряжением), или реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

Краны. Все краны вакуумной установки — стеклянные. Стенки кранов тонкие, пробки кранов — полые и составляют одно целое с рукоятками. Пробки кранов притерты к корпусам. Для герметизации используется вакуумная смазка. Через стенки кранов видны отверстия в пробке крана, так что всегда можно понять, как он работает. Если на поверхности шлифа видны круговые полосы, то кран либо плохо притерт, либо неправильно смазан и может пропускать воздух. За кранами нужно внимательно следить. Краны работают лишь в том случае, если давление внутри крана меньше атмосферного. При этом пробка вдавливается внутрь крана.

Кран K_1 используется для заполнения форвакуумного насоса и вакуумной установки атмосферным воздухом. Во время работы установки он должен быть закрыт. Трехходовой кран K_2 служит для соединения форвакуумного насоса с установкой или атмосферой. Кран

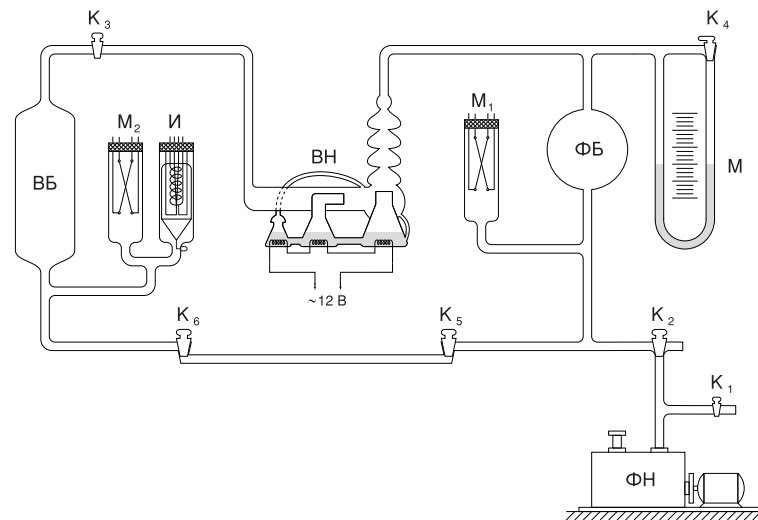


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

K_3 отделяет высоковакуумную часть установки от форвакуумной. Кран K_4 соединяет между собой колена масляного манометра. Он должен быть открыт во все время работы установки и закрывается лишь при измерении давления в форвакуумной части. Краны K_5 и K_6 стоят по концам капилляра и соединяют его с форвакуумной и высоковакуумными частями установки. Суммарный объем обоих кранов 50 см^3 . Диаметр капилляра $0,9 \text{ мм}$. Его длина 300 мм . На каждой установке указан точный объем кранов.

Форвакуумный насос. Устройство и принцип действия ротационного пластинчатого форвакуумного насоса схематически показаны на рис. 2.

В цилиндрической полости массивного корпуса размещен эксцентрично ротор так, что он постоянно соприкасается своей верхней частью с корпусом. В диаметральный разрез ротора вставлены две пластины, раздвигаемые пружиной и плотно прижимаемые к поверхности полости. Они разделяют объем между ротором и корпусом на две части.

Действие насоса ясно из изображенных на рис. 2 последовательных положений пластин при вращении ротора по часовой стрелке. В положении «а» газ из откачиваемого объема поступает в простран-

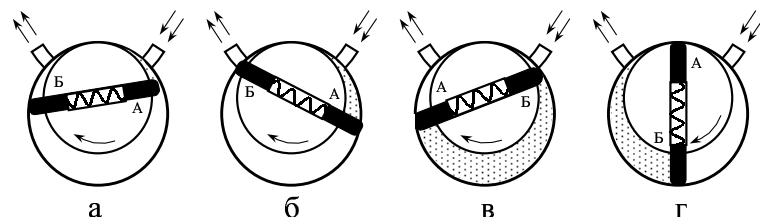


Рис. 2. Схема действия ротационного двухпластинчатого форвакуумного насоса. В положениях «а» и «б» пластина «А» засасывает разреженный воздух из откачиваемого объема, а пластина «Б» вытесняет ранее захваченный воздух в атмосферу. В положениях «в» и «г» пластины поменялись ролями

ство между пластиной «А» и линией соприкосновения корпуса и ротора. По мере вращения это пространство увеличивается (рис. 2 б), пока вход в него не перекроет другая пластина «Б» (рис. 2 в). После того как пластина «А» пройдет выходное отверстие и линию соприкосновения (рис. 2 г), лопасть «Б» будет сжимать следующую порцию газа и вытеснять его через клапан в атмосферу.

При работе с насосом следует помнить, что после остановки насоса в него обязательно нужно впускать воздух. Если этого не делать, то атмосферное давление может выдавить масло из насоса в патрубки и в вакуумную систему. Соединять насос с атмосферой следует при помощи кранов K_1 или K_2 .

После включения насоса его присоединяют к установке не сразу, а через некоторое время, когда насос откачает сам себя и пространство, расположенное до крана K_2 . Об этом можно судить по звуку насоса. Вначале насос сильно шумит, затем его звук делается мягким, и, наконец, в насосе возникает сухой стук, — это происходит, когда достигается хорошее разрежение.

Диффузионный насос. Откачивающее действие диффузионного насоса основано на диффузии (внедрении) молекул разреженного воздуха в струю паров масла. Попавшие в струю молекулы газа увлекаются ею и уже не возвращаются назад. На прежнем их месте образуется пустота, которая немедленно заполняется следующими порциями газа, увеличивая степень разрежения газа в окрестности струи и оказывая таким образом сильное откачивающее воздействие на весь газ в откачиваемом объеме. Скорость откачки диффузионных насосов в сотни и тысячи раз превосходит скорость откачки форвакуумного насоса.

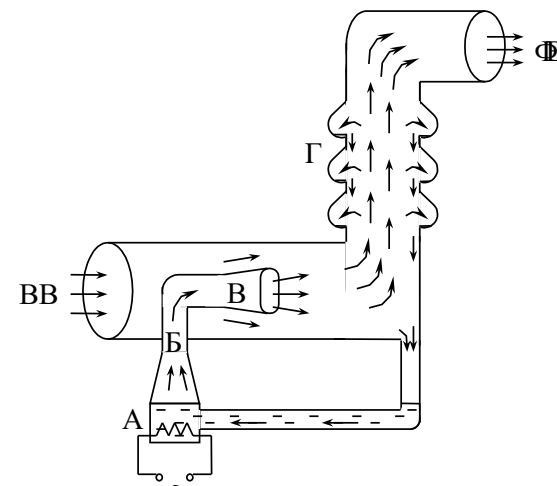


Рис. 3. Схема работы диффузионного насоса

Устройство одной ступени масляного диффузионного насоса схематически показано на рис. 3 (в лабораторной установке используется несколько откачивающих ступеней). Масло, налитое в сосуд А, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубе Б и вырываются из сопла В. Струя паров увлекает молекулы газа, которые поступают из откачиваемого сосуда через трубку ВВ. Дальше смесь попадает в вертикальную трубу Г. Здесь масло осаждается на стенках трубы и маслосборников и стекает вниз, а оставшийся газ через трубу ФВ откачивается форвакуумным насосом. Диффузионный насос работает наиболее эффективно при давлении, когда длина свободного пробега молекул воздуха примерно равна ширине кольцевого зазора между соплом В и стенками трубы ВВ. В этом случае пары масла увлекают молекулы воздуха из всего сечения зазора.

Давление насыщенных паров масла при рабочей температуре, создаваемой обогревателем сосуда А, много больше $5 \cdot 10^{-2}$ торр. Именно поэтому пары масла создают плотную струю, которая и увлекает с собой молекулы газа. Если диффузионный насос включить при давлении, сравнимом с давлением насыщенного пара масла, то последнее никакой струи не создаст и масло будет просто окисляться и угорать.

Граничное давление, выше которого диффузионный насос вклю-

чать нельзя, на вакуумметрах термопарных ламп отмечено красной линией ($\sim 1,2$ мВ).

Диффузионный насос, используемый в нашей установке (см. рис. 1), имеет две ступени и соответственно два сопла. Одно сопло вертикальное (первая ступень), второе сопло горизонтальное (вторая ступень). За второй ступенью имеется еще одна печь, но пар из этой печи поступает не в сопло, а по тонкой трубке подводится ближе к печке первой ступени. Эта печь осуществляет фракционирование масла. Легколетучие фракции масла, испаряясь, поступают в первую ступень, обогащая ее легколетучей фракцией масла. По этой причине плотность струи первой ступени выше и эта ступень начинает откачивать при более высоком давлении в форвакуумной части установки. Вторая ступень обогащается малолетучими фракциями. Плотность струи второй ступени меньше, но меньше и давление насыщенных паров масла в этой ступени. Соответственно в откачиваемый объем поступает меньше паров масла и его удастся откачать до более высокого вакуума, чем если бы мы работали только с одной ступенью.

При работе с диффузионным насосом необходимо придерживаться следующего порядка, отклонения от которого ведут к порче установки. Включать подогрев диффузионного насоса можно лишь после того, как вакуум в системе доведен до $5 \cdot 10^{-2}$ торр при помощи форвакуумного насоса. При недостаточном предварительном разрежении масло в диффузионном насосе портится.

Спираль, опущенная в масло, подогревается переменным током ($U \approx 12$ В). Ток регулируется автотрансформатором в пределах от 1 до 1,5 А. При включении подогрева давление в системе сначала возрастает вследствие выделения растворенного в масле воздуха. Минут через 10 после начала подогрева начинается интенсивное испарение масла, заметное по появлению на стенках насоса пленки конденсирующихся паров. Не следует допускать слишком интенсивного кипения масла.

Масляный манометр представляет собой U-образную трубку, до половины наполненную вязким маслом, обладающим весьма низким давлением насыщенных паров. Так как плотность масла мала, $\rho = 0,9$ г/см³, то при помощи манометра можно измерить только небольшие разности давлений (до нескольких торр). Во время откачки и заполнения установки атмосферным воздухом кран K_4 соединяющий оба колена манометра, должен быть открыт во избежание выброса масла и загрязнения установки. Кран K_4 закрывается только при измерении давления U-образным манометром.

Из-за большой вязкости масла уровни в манометре устанавливаются не сразу.

Термопарный манометр. Чувствительным элементом манометра является платино-платинородиевая термопара, спаянная с никелевой нитью накала и заключенная в стеклянный баллон (лампа ЛТ-2 или ПМТ-2). Устройство термопары пояснено на рис. 4. По нити накала НН пропускается ток постоянной величины. Для установки тока служит потенциометр R — «Рег. тока накала», расположенный на передней панели вакуумметра. Термопара ТТ присоединяется к милливольтметру¹, показания которого определяются температурой нити накала и зависят от отдачи тепла в окружающее пространство.

Потери тепла определяются теплопроводностью нити и термопары, теплопроводностью газа, переносом тепла конвективными потоками газа внутри лампы и теплоизлучением нити (инфракрасное тепловое излучение). В обычном режиме лампы основную роль играет теплопроводность газа. При давлениях ≥ 1 торр теплопроводность газа, а вместе с ней и ЭДС термопары практически не зависят от давления газа, и прибор не работает.

При улучшении вакуума средний свободный пробег молекул становится сравнимым с диаметром нити², теплоотвод падает и температура спая возрастает. При вакууме $\sim 10^{-3}$ торр теплоотвод, осуществляемый газом, становится сравнимым с другими видами потерь тепла и температура нити становится практически постоянной. Градуировочная кривая термопары ПМТ-2 приведена на рис. 5.

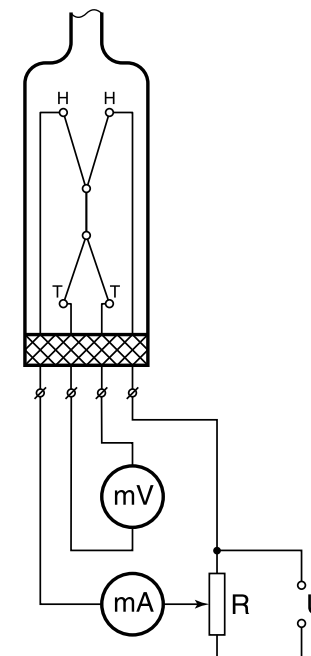


Рис. 4. Схема термопарного манометра с лампой ЛТ-2

¹На измерительном блоке термовакuumметра имеется всего один прибор. При переводе тумблера в положение «Ток накала» прибор подключается в качестве миллиамперметра в цепь нити накала, а в положении «Измерение» он включается в качестве милливольтметра в цепь термопары.

²Наиболее резкий перепад температуры в газе, заполняющем лампу, происходит вблизи нити на расстояниях, превышающих ее радиус не более чем в несколько раз.

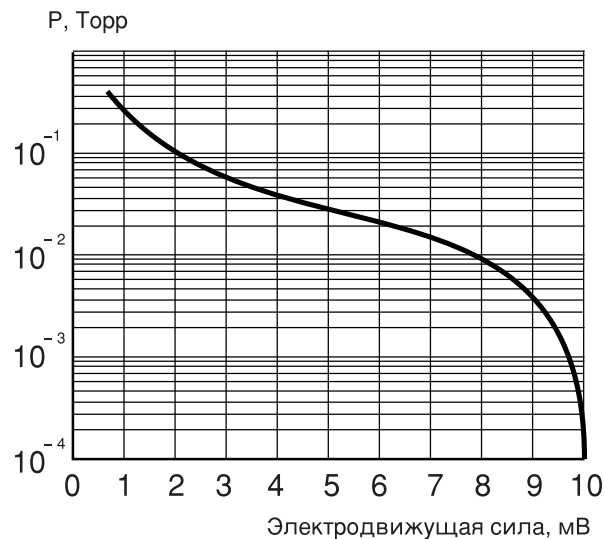


Рис. 5. Градуировочная кривая термопары ЛТ-2

Ионизационный манометр. Схема ионизационного манометра изображена на рисунке 6. Он представляет собой трехэлектродную лампу. Электроны испускаются накалившимся катодом и увлекаются электрическим полем к аноду, имеющему вид редкой спирали. Проскакивая за ее витки, электроны замедляются полем коллектора и возвращаются к катоду, а от него вновь увлекаются к аноду. Прежде чем осесть на аноде, они успевают много раз пересечь пространство между катодом и коллектором. На своем пути электроны ионизуют молекулы газа. Ионы, образовавшиеся между анодом и коллектором, притягиваются полем коллектора и определяют его ток.

Ионный ток в цепи коллектора пропорционален плотности газа и поэтому может служить мерой давления. Вероятность ионизации зависит от рода газа, заполняющего лампу (а значит, и откачиваемый объем). Калибровка манометра верна, если остаточным газом является воздух.

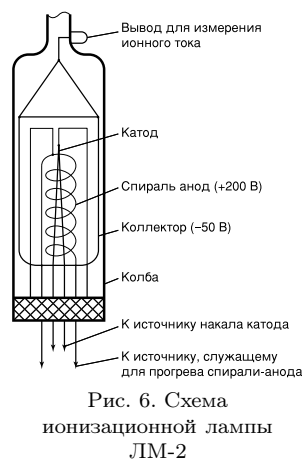


Рис. 6. Схема ионизационной лампы ЛМ-2

Накаленный катод ионизационного манометра перегорает, если давление в системе превышает $1 \cdot 10^{-3}$ торр. Поэтому включать ионизационный манометр можно, только убедившись по термопарному манометру, что давление в системе не превышает 10^{-3} торр.

При измерении нить ионизационного манометра сильно греется. При этом она сама, окружающие ее электроды и стенки стеклянного баллона могут десорбировать поглощенные ранее газы. Выделяющиеся газы изменяют давление в лампе и приводят к неверным показаниям. Поэтому перед измерениями ионизационный манометр прогревается (обезгаживается) в течение 10–15 мин. Для прогрева пропускается ток через спиральный анод лампы.

Процесс откачки. Производительность насоса определяется скоростью откачки W (л/с): W — это объем газа, удаляемого из сосуда при данном давлении за единицу времени. Скорость откачки форвакуумного насоса равна емкости воздухозаборной камеры, умноженной на число оборотов в секунду.

Рассмотрим обычную схему откачки. Разделим вакуумную систему на две части: «откачиваемый объем» (в состав которого включим используемые для работы части установки) и «насос», к которому, кроме самого насоса, отнесем трубопроводы и краны, через которые производится откачка нашего объема. Обозначим через Q_d количество газа, десорбирующегося с поверхности откачиваемого объема в единицу времени, через Q_n — количество газа, проникающего в единицу времени в этот объем извне — через течи. Будем считать, что насос обладает скоростью откачки W и в то же время сам является источником газа; пусть Q_n — поток газа, поступающего из насоса назад в откачиваемую систему. Будем измерять количество газа Q_d , Q_n и Q_n в единицах PV (легко видеть, что это произведение с точностью до множителя RT/μ равно массе газа). Основное уравнение, описывающее процесс откачки, имеет вид

$$-VdP = (PW - Q_d - Q_n - Q_n)dt. \quad (1)$$

Левая часть этого уравнения равна убыли газа в откачиваемом объеме V , а правая определяет количество газа, уносимого насосом, и количество прибывающего вследствие перечисленных выше причин за время dt . При достижении предельного вакуума (давление $P_{пр}$)

$$\frac{dP}{dt} = 0,$$

так что

$$P_{\text{пр}} W = Q_{\text{д}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{и}}. \quad (2)$$

Из этого уравнения найдем формулу, выражающую скорость откачки через предельный вакуум:

$$W = \left(\sum Q_i \right) / P_{\text{пр}}.$$

Обычно $Q_{\text{и}}$ постоянно, а $Q_{\text{н}}$ и $Q_{\text{д}}$ слабо зависят от времени, поэтому в наших условиях все эти члены можно считать постоянными. Считая также постоянной скорость откачки W , уравнение (1) можно проинтегрировать и, используя (2), получить

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}}) \exp \left(-\frac{W}{V} t \right), \quad (3)$$

где P_0 — начальное давление. Оно обычно велико по сравнению с $P_{\text{пр}}$, поэтому можно записать, что

$$P = P_0 \exp \left(-\frac{W}{V} t \right) + P_{\text{пр}}. \quad (4)$$

Постоянная времени откачки $\tau = V/W$ является мерой эффективности откачной системы.

Рассмотрим теперь, чем определяется скорость откачки системы. По условию эта скорость характеризует действие всей откачивающей системы, которую мы пока обозначали общим понятием «насос». На самом деле эта система состоит из собственно насоса, а также из кранов и трубопроводов, соединяющих его с откачиваемым объемом.

При математическом описании откачивающей системы возникают уравнения, очень похожие на уравнения Кирхгофа, описывающие протекание тока в электрических цепях. Перепад давления ΔP заменяет разность электрических потенциалов, поток газа — силу тока, а пропускная способность элементов вакуумной системы — проводимость элементов цепи. Закон сложения пропускных способностей аналогичен закону сложения проводимостей³. При последовательном соединении элементов

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{\text{н}}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots, \quad (5)$$

³ Следует иметь в виду, что понятие пропускной способности аналогично электропроводности только при молекулярном режиме течения. При вязкостном течении пропускная способность трубы зависит не только от разности, но и от полусуммы давлений на ее концах.

где W — скорость откачки системы, $W_{\text{н}}$ — скорость откачки собственно насоса, а C_1 , C_2 и т. д. — пропускные способности элементов вакуумной системы. Формула (5) показывает, что пропускная способность трубопроводов столь же сильно влияет на эффективность откачки, как и производительность насоса. Не имеет смысла ставить большой насос, если соединительные трубки недостаточно широки. Практическое правило заключается в том, что диаметры соединительных трубок не очень существенны в форвакуумной части установки и крайне важны в высоковакуумной. Диаметр трубок в этой части должен быть не меньше, чем диаметр самого насоса.

Течение газа через трубу. Характер течения газа существенно зависит от соотношения между размерами системы и длиной свободного пробега молекул. При атмосферном давлении и даже при понижении давления до форвакуумного длина свободного пробега меньше диаметра трубок и течение откачиваемого газа определяется его вязкостью, т. е. взаимодействием его молекул. При переходе к высокому вакууму картина меняется. Столкновения молекул между собой начинают играть меньшую роль, чем соударения со стенками. Течение газа в трубе напоминает в этих условиях диффузию газа из области больших концентраций в области, где концентрация ниже, причем роль длины свободного пробега играет ширина трубы.

Для количества газа, протекающего через трубу в условиях высокого вакуума или, как говорят, в *кнудсеновском режиме*, справедлива формула (3.6):

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3} r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_2 - P_1}{l}. \quad (6)$$

Применим эту формулу к случаю, когда труба соединяет установку с насосом.

Пренебрежем давлением P_1 у конца, обращенного к насосу. Будем измерять количество газа, покидающего установку при давлении $P = P_2$. Пропускная способность трубы

$$C_{\text{тр}} = \left(\frac{dV}{dt} \right)_{\text{тр}} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}}. \quad (7)$$

Мы видим, что пропускная способность зависит от радиуса трубы в третьей степени и обратно пропорциональна ее длине. В вакуумных установках следует поэтому применять широкие короткие трубы.

При расчете вакуумных систем нужно принимать во внимание также пропускную способность отверстий, например, в кранах. Для них имеется формула

$$\nu = \frac{1}{4} S n \bar{v}, \quad (8)$$

где ν — число молекул, вылетающих из отверстия в вакуум в единицу времени, S — площадь отверстия, n — концентрация молекул перед отверстием, \bar{v} — средняя скорость молекул газа (2.2).

С другой стороны, $\nu = dN/dt$, $N = PV/kT$, $n = P/kT$, и аналогично формуле (7) для количества газа, покидающего установку при давлении P , получается пропускная способность отверстия

$$C_{\text{отв}} = \left(\frac{dV}{dt} \right)_{\text{отв}} = S \frac{\bar{v}}{4}. \quad (9)$$

Для воздуха при комнатной температуре $\bar{v}/4 = 110 \text{ м/с} = 11 \text{ л/с} \cdot \text{см}^2$.

Формулу (9) можно получить непосредственно из условия

$$v = C_{\text{отв}} n,$$

выражающего эквивалентность откачивающего действия отверстия, открытого в высокий вакуум, и поршня, расширяющего объем со скоростью $C_{\text{отв}}$ (л/с).

Для диффузионного насоса можно считать, что каждая молекула воздуха, попавшая в кольцевой зазор между соплом и стенками насоса, увлекается струей пара и не возвращается обратно в откачиваемый объем. Скорость откачки такого насоса можно считать равной пропускной способности отверстия с площадью, равной площади кольцевого зазора, т. е. насос качает как кольцевой зазор, с одной стороны которого расположен откачиваемый объем, а с другой — пустота.

ЗАДАНИЕ

I. Определение объема форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Проверьте, что кран K_4 открыт. Откройте все краны, кроме K_1 и K_2 .
2. Впустите в установку атмосферный воздух через краны K_1 и K_2 .
3. Закройте краны K_5 и K_6 (поверните рукоятки кранов вверх), в этих кранах и соединяющем их капилляре «запирается» 50 см^3 воздуха при атмосферном давлении (точный объем указан на установках).

4. Закройте краны K_1 и K_2 , включите форвакуумный насос и дайте ему откачать себя. Подключите установку к форвакуумному насосу краном K_2 и откачайте установку до давления 10^{-2} торр.
5. Повернув рукоятку крана K_2 , отсоедините установку от форвакуумного насоса. Оставьте форвакуумный насос работать «на себя».
6. Перекрыв кран K_3 , отделите высоковакуумную часть установки от форвакуумной.
7. Закрыв кран K_4 , приведите в готовность масляный манометр.
8. Откройте кран K_5 . «Запертый» воздух распространится по всему объему форвакуумной части установки и повысит в ней давление. Измерьте это давление масляным манометром.
9. Зная объем «запертого» воздуха (см. п. 3), найдите, пользуясь законом Бойля–Мариотта, объем $V_{\text{фв}}$ форвакуумной части.
10. Откройте кран K_3 , чтобы газ, занимавший до сих пор только форвакуумную часть установки, заполнил и ее высоковакуумную часть. Вновь измерьте показания манометра. Рассчитайте полный объем установки и объем высоковакуумной ее части $V_{\text{вв}}$.
11. Измерения по п. 1–10 повторите еще раз.
12. Откройте кран K_4 .

II. Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

1. Откачайте установку форвакуумным насосом. Убедитесь в том, что краны в установке повернуты так, что в ней не осталось «запертых» объемов.
2. Включите термодарные манометры. Установите токи в лампах по их паспортам (токи должны быть указаны на приборах вакуумметров). Переключите прибор манометра в режим измерения ЭДС, определите величину термоэдс и по графику — давление в системе.

В некоторых термовакуумметрах ЭДС термодары и соответствующее ей давление указаны на шкале прибора.

3. После того как давление упадет ниже $3 \cdot 10^{-2}$ торр, закройте кран K_6 и начните высоковакуумную откачку. Для этого включите нагреватель диффузионного насоса и подождите около 10 минут. Убедитесь в том, что масло в насосе закипело и у края отверстия образовалась пленка выбрасываемого из сопла и конденсирующегося на стенках масла. При работе диффузионного насоса должен работать и форвакуумный насос.

Манометр M_1 должен показывать давление около 10^{-2} торр, а показания милливольтметра манометра M_2 должны быстро возрастать.

В правильно отградуированном манометре стрелка должна дойти до конца шкалы.

4. Включите ионизационный манометр. Порядок его включения указан в инструкции на столе установки.
5. Измерьте предельное давление $P_{\text{пр}}$ в системе и запишите его. При $P < 10^{-4}$ торр убедитесь в правильности градуировки термоманометра M_2 . При необходимости сообщите преподавателю о том, что надо сделать поправку в паспорте.
6. Найдите скорость откачки по улучшению вакуума во время откачки. Для этого:
 - а) отключите откачку высоковакуумного баллона краном K_3 , и подождите, пока вакуум достаточно ухудшится — до $(5-9) \cdot 10^{-4}$ торр;
 - б) откройте кран K_3 и отмечайте изменение показаний ионизационного манометра во времени;
 - в) изобразите полученные результаты на графике, выбрав его координаты так, чтобы было удобно сравнить их с формулой (4), то есть, чтобы график имел вид прямой линии;
 - г) рассчитайте W системы.
7. Оцените величину потока Q_n . Для этого:
 - а) перекройте кран K_3 и прекратите таким образом откачку высоковакуумной части системы. При помощи ионизационного вакуумметра и секундомера следите за тем (и запишите в тетрадь), как ухудшается вакуум. Опыт следует прекратить, когда давление в системе дорастет до $(9-10) \cdot 10^{-4}$ торр. В этот момент кран K_3 нужно снова открыть, чтобы не пережечь ионизационный манометр;
 - б) используя значение W , найденное в п. 6 и учтя, что уравнение (1) для этого случая принимает вид $V_{\text{вв}} dP = (Q_d + Q_n)dt$, оцените Q_n .
8. Проведите повторные измерения по пунктам 6 и 7. Оцените пропускную способность трубки от высоковакуумного баллона до насоса и сравните ее с измеренной скоростью откачки.
9. Откройте кран K_6 и введите таким образом в прибор искусственную течь (высоковакуумная часть установки соединена через капилляр с форвакуумной). Вакуум в установке должен ухудшиться. Измерьте установившееся давление $P_{\text{уст}}$ и давление со стороны форвакуумной части капилляра.
10. Рассчитайте производительность насоса по различию $P_{\text{уст}}$ и $P_{\text{пр}}$. Для этого найдите количество газа, протекающего через капилляр, по

формуле (6). Запишем формулу (2) для случаев, когда капилляр перекрыт и когда он открыт:

$$P_{\text{пр}}W = Q_1, \quad P_{\text{уст}}W = Q_1 + \frac{d(PV)_{\text{капилл}}}{dt}.$$

В этих формулах символом Q_1 обозначена сумма всех натеканий, кроме натекания через искусственную течь. Исключите из этих формул натекание Q_1 и найдите скорость откачки системы (в том сечении, где присоединен манометр).

Сравните получившееся значение W с полученным в п. 6. Прокомментируйте причины возможного их несовпадения.

11. Выключите установку. Для этого:

- а) выключите накал ионизационного манометра тумблером «Накал» и дайте его лампе остыть, подождя 1–2 мин. Извлеките предохранитель и сдайте его преподавателю или лаборанту;
- б) выключите подогрев диффузионного насоса, подождите, пока масло в диффузионном насосе остынет (~ 10 минут);
- в) краном K_2 отсоедините установку от форвакуумного насоса, не сообщая ее с атмосферой;
- г) в этих условиях давление во всех частях установки должно быть одинаково, одинаковы должны быть и показания термодинамических манометров M_1 и M_2 . Так как термовакuumметр уже откалиброван при высоком вакууме, то по его показаниям можно отрегулировать манометр M_1 . Сделайте это;
- д) выключите форвакуумный насос и, когда он остановится, соедините его с атмосферой краном K_1 , не напуская атмосферу в установку;
- е) выключите вакуумметры тумблерами «Сеть».

Контрольные вопросы

1. В каких условиях теплопроводность и вязкость газов не зависят от давления?
2. Почему термовакuumметр не меняет показаний при уменьшении давления ниже 10^{-4} торр?
3. Для чего в ионизационном манометре движению электронов придан колебательный характер?
4. Почему пропускная способность труб в молекулярном режиме не зависит от размеров молекул?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белонучкин В.Е., Заикин Д.А., Ципенюк Ю.М. Основы физики. Т. 2 Квантовая и статистическая физика. — М.: Физматлит, 2001. Ч. 5. Гл. 1. § 1.3

2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. Т. 1. Физические основы механики. Молекулярная физика. Колебания и волны. — М.: Физматгиз, 1962. Гл. VII, §§ 50–55.
3. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. — М.: Физматгиз, 1976. Гл. §§ 57, 59.
4. Коротков П.Ф. Молекулярная физика и термодинамика. — М.: МФТИ, 2001. С. 86, 92–93.
5. Сборник задач по общему курсу физики / Под ред. В.А. Овчинкина. Часть 1. М.: изд-во МФТИ, 1998. С. 226–227, 234–236.

Приложение. Характеристики газов

1. Длина свободного пробега молекул азота при комнатной температуре:

P, торр	760	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
λ , см	$6 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-1}$	5	50	500

2. Давление насыщенных паров вакуумного масла, применяемого в диффузионных насосах, $\sim 10^{-7}$ – 10^{-10} торр (при комнатной температуре).
3. Скорость выделения газов при комнатной температуре (в основном CO и H₂O) после нескольких часов откачки (в торр · л/(см²·с)):

Стекло	Металл	Нейлон
10^{-9} – 10^{-8}	10^{-9} – 10^{-10}	$2 \cdot 10^{-8}$

4. Обратная диффузия газов из диффузионных насосов. Максимальное отношение выходного давления к входному:

H ₂	He	N ₂
10^3 – 10^4	10^4 – 10^5	10^7

Работа 2.3.2

Изучение процесса электрооткачки

Цель работы: 1) регистрация зависимости ионного тока от времени в лампе ионизационного манометра; 2) определение полного числа частиц, поглощенных коллектором лампы в процессе установления тока.

В работе используются: лампа ЛМ-2 или ПМИ-2; вакуумметр ВИТ-2; самописец; калибратор.

Для удаления газа из объемов применяют вакуумные насосы. Давление выше 10^{-3} торр обычно создается при помощи механических насосов. Для получения более высокого разрежения до последнего времени употребляли главным образом диффузионные насосы, в которых молекулы газа увлекаются из откачиваемого объема струей пара кипящего масла. При этом применяются специальные масла, пары которых при нормальной температуре имеют небольшое давление ($< 10^{-7}$ торр).

В последние годы все более широкое распространение получают новые методы откачки — сорбционный¹ и ионный. В насосах сорбционного типа молекулы газа связываются подходящими сорбентами — веществами с сильно развитой поверхностью или атомами металла (обычно титана), испаряемого, а затем конденсирующегося в насосе. В ионных насосах атомы газа сначала ионизируются, а потом ускоряются электрическим полем и «заколачиваются» им в стенки катода. Нередко используются оба эти явления одновременно (ионно-абсорбционные насосы).

В настоящей работе исследуются явления, происходящие при ионной откачке (электрооткачка). В качестве насоса и измерителя вакуума используется лампа ионизационного манометра, устройство которой изображено на рис. 6 работы 2.3.1. Лампа состоит из нити накала, навитого вокруг неё в виде редкой спирали анода и цилиндрического

¹ Сорбция: поглощение твердым телом или жидкостью (сорбентом) жидкого вещества или газа (сорбата) из окружающей среды.

Абсорбция: поглощение (извлечение) вещества из газовой смеси всем объёмом жидкости или твёрдого тела (абсорбата).

Адсорбция: поглощение вещества (адсорбата) из газообразной или жидкой среды на поверхность её раздела с жидкостью или твёрдым телом (адсорбентом) (см. с. 181).

Десорбция: удаление адсорбированного вещества с поверхности адсорбента, процесс, обратный адсорбции.