

## Изучение работы форвакуумного насоса

Область низких давлений (меньших, чем 1 тор) принято разделять на несколько диапазонов:

$1 - 10^{-4}$  тор — предварительный вакуум (форвакуум);

$10^{-4} - 10^{-7}$  тор — высокий вакуум;

ниже  $10^{-7}$  тор — сверхвысокий вакуум.

Такое разделение вызвано тем, что переход от одной области разрежения в другую требует применения качественно новых методов откачки и измерения давления. Для получения форвакуума достаточно применение механического (форвакуумного) насоса. Высокий вакуум получают обычно с помощью диффузионных (ртутных или паромасляных) насосов, предварительное разрежение для которых создается форвакуумным насосом. С получением и измерением высокого вакуума вы познакомитесь позже, выполняя соответствующую лабораторную работу. Для получения сверхвысокого вакуума требуются особые меры, которые мы рассматривать не будем.

Для получения предварительного вакуума в лабораторной практике наиболее распространены пластинчато-статорные ротационные форвакуумные насосы. В нашей лаборатории используются насосы РВН-20 и ВН-461. Рассмотрим работу пластинчато-статорного насоса (рис.1). В таком насосе в полости статора 1 вращается цилиндрический ротор 2. Ось вращения ротора совпадает с осью полости статора, но не совпадает с осью самого ротора. Одна из образующих ротора всё время скользит по поверхности полости статора. Пластина 3 пружиной прижимается к ротору и совершает колебательное движение вверх-вниз в прорези статора. Пластина и ротор делят полость статора на два объёма: расширяющийся (I) и сжимающийся (II). Первый объём соединён с откачиваемой установкой, второй — с атмосферой через клапан 4. Камера насоса помещена в бак с вакуумным маслом, которое предотвращает проникание воздуха через сочленения, а также смазывает ротор и уплотняет скользящие линии соприкосновения ротора со статором и пластиной.

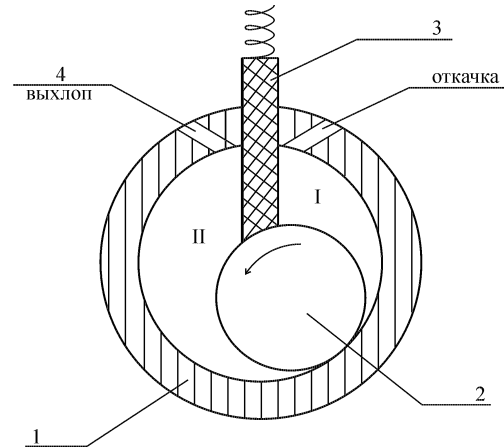


Рис. 1.

Форвакуумный насос, как и любой другой насос, характеризуется *рабочей областью давлений* и скоростью откачки. Рабочая область давлений со стороны низких давлений лимитируется предельным вакуумом — наименьшим давлением, которое можно получить с помощью данного насоса, а со стороны высоких давлений — предельным противодавлением (давление на выхлопе), при котором насос обеспечивает гарантированный вакуум на входе.

Величина предельного вакуума по воздуху у масляноротационных насосов порядка  $10^{-3}$  тор. Она определяется вредным объёмом в полости насоса, который практически всегда существует вблизи клапана, откуда воздух не может быть вытолкнут ротором, а также давлением паров масла, растворимостью воздуха в масле и продуктами разложения масла, которые образуются из-за нагрева и трения между деталями насоса.

Предельное противодавление для форвакуумного насоса — одна атмосфера, то есть такой насос не требует предварительного разрежения.

Скорость откачки равна объёму газа, проходящего через поперечное сечение на входе насоса в единицу времени при давлении, существующем в этом сечении в момент определения. Она измеряется в литрах/сек.

Скорость откачки при давлении вдали от предельного легко вычислить. Если ротор совершает  $n$  оборотов в единицу времени, а рабочий объём насоса  $V_n$  (равный сумме объёмов I и II), то скорость откачки  $S$  равна:

$$S = \frac{V_n}{n}$$

Легко показать (выведите эту формулу сами), что когда давление приближается к предельному,  $P_{\text{пред}}$ , скорость откачки падает и равна

$$S_{\text{пред}} = S \left( 1 - \frac{P_{\text{пред}}}{P} \right)$$

Насос соединяется с откачиваемой системой трубопроводом, что ещё уменьшает реальную скорость откачки.

Скорость откачки определяет процесс понижения давления в вакуумной системе. Если откачивается объём  $V$ , и натекание в систему отсутствует, то изменение давления со временем определяется из уравнения

$$dP = -\frac{S}{V} P dt \quad (1)$$

Пока давление не слишком мало, скорость откачки  $S$  можно считать постоянной и тогда решение уравнения (1) даёт

$$P(t) = P_0 e^{-\frac{S}{V}(t-t_0)}$$

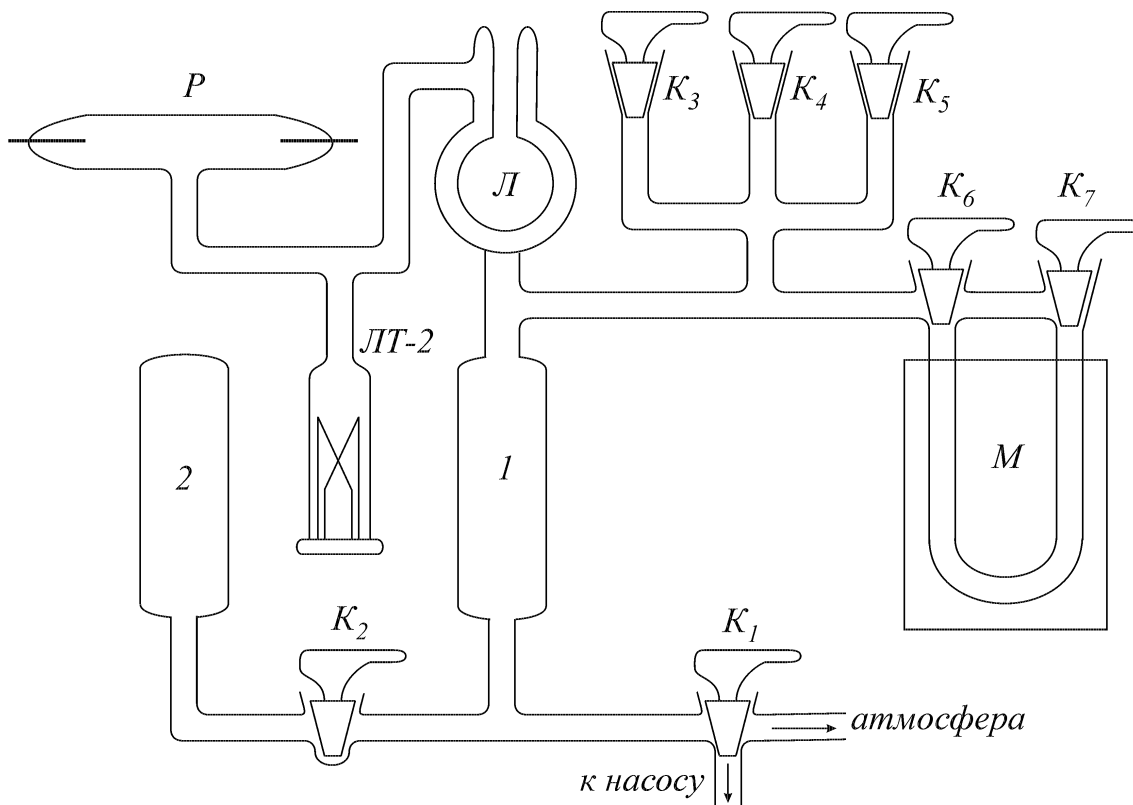


Рис. 2.

Измерив зависимость давления от времени и зная объём  $V$ , можно было бы вычислить скорость откачки. К сожалению, практически такие измерения провести трудно из-за инерционности манометров. С другой стороны, на практике чаще встречаются динамические системы, в которых имеется непрерывное натекание газа либо принципиально необходимое для работы прибора (например, в масспектрометре осуществляется непрерывная подача анализируемого газа), либо происходящая из-за негерметичности системы и газоотделения со стенок. В этом случае скорость откачки можно определить по величине предельно достижимого вакуума. Пусть скорость натекания — количество газа, поступающее в систему в единицу времени — равна

$$U_{\text{натек}} = P_{\text{пред}} S$$

откуда

$$S = \frac{U_{\text{натек}}}{P_{\text{пред}}}$$

Для нахождения скорости откачки при давлении  $P_{\text{пред}}$ , необходимо определить скорость натекания  $U_{\text{натек}}$ . Если известен объём системы  $V$ , а за время  $t$  давление в ней изменилось от  $P_1$  до  $P_2$ , то скорость натекания, при условии, что  $P_1$  и  $P_2$  малы по сравнению с атмосферным давлением, равна

$$U_{\text{натек}} = V \frac{P_2 - P_1}{t}$$

### Задача работы и экспериментальная установка

Цель данной работы — определить предельный вакуум и скорость откачки пластинчато-статорного ротационного насоса ВН-461 (или РВН-20) и приобрести навыки в работе с вакуумной установкой.

Схематическое изображение вакуумной установки приведено на рис. 2. Форвакуумный насос для безопасности и уменьшения шума помещен в специальный отсек и соединен со стеклянной вакуумной установкой толстостенной резиновой трубкой через кран  $K_1$ . Основная часть вакуумной установки состоит из баллонов 1 и 2, разрядной трубки  $P$ , ловушки  $L$ , кранов  $K_3, K_4, K_5$  для дозированного впуска воздуха в установку, датчика терморпарного вакуумметра (лампы ЛТ-2) и V-образного масляного манометра  $M$  с кранами  $K_6$  и  $K_7$ . Баллон 2 является калибровочным. Величина его объёма указана на установке. Кран  $K_2$  позволяет отсоединять калибровочный баллон от остальной части установки.

Кран  $K_1$  может быть в одном из трех положений:

1. Форвакуумный насос откачивает установку.
2. Насос отсоединен и от установки, и от атмосферы.
3. Насос соединен с атмосферой.

При работе с вакуумной установкой требуется большая внимательность и осторожность.

Помните:

**Краны нужно открывать медленно и плавно, придерживая патрубков крана другой рукой.**

**При выключении форвакуумного насоса необходимо немедленно напустить в него атмосферу, поставив кран  $K_1$  в положение «З», иначе масло из насоса будет засосано в установку.**

### Измерение давления масляным манометром

Устройство масляного манометра видно из рис. 2. Параллельно трубкам манометра расположена линейка, которая позволяет измерить разницу уровней масла в коленах манометра  $P_{\text{масл}}$  (выражается в мм). Значение давления в мм рт. ст. будет во столько раз меньше, во сколько ртуть тяжелее масла, т. е.:

$$P_{\text{мм рт. ст.}} = \frac{\rho_{\text{масл}}}{\rho_{\text{рт.}}} P_{\text{масл}}$$

где  $\rho_{\text{рт.}} = 13,6 \text{ г/см}^3$ . Значение  $\rho_{\text{масл}}$  указано возле манометра.

При подготовке манометра к работе открывают краны  $K_6$  и  $K_7$  и откачивают установку до предельно допустимого вакуума. Потом закрывают кран  $K_7$  — манометр к работе готов!

**Если нужно впустить воздух в установку с работающим манометром, то это надо делать очень медленно и осторожно. Давление в установке можно поднимать только до такого предела, чтобы уровень масла в манометре не опустился до места перегиба, иначе пузырьки воздуха прорвутся в откачанное колено, и подготовку к работе придётся начинать заново.**

Масляный манометр позволяет измерять давления порядка нескольких мм рт. ст. Для измерения более низких давлений служит терморпарный манометр (вакуумметр).

### Измерение давления терморпарным вакуумметром

Принцип действия терморпарного вакуумметра основан на измерении скорости отдачи тепла нагретым телом. Согласно классической теории идеальных газов коэффициент теплопроводности газа равен

$$\kappa = \alpha \bar{\lambda} \bar{v} c_v$$

где  $\rho$  — плотность газа,  $\bar{\lambda}$  — средняя длина свободного пробега молекул газа,  $\bar{v}$  — средняя скорость теплового движения молекул газа,  $c_v$  — удельная теплоёмкость газа. Коэффициент  $\alpha$  согласно элементарной теории равен  $\frac{1}{3}$ , более строгое рассмотрение даёт для него значения от 0,5 до 1,25 в зависимости от рода газа. При высоких давлениях ( $\bar{\lambda} \ll d$ , где  $d$  — расстояние между телами, между которыми идёт теплообмен)  $\kappa$  не зависит от давления  $p$ . Это вытекает из того, что плотность  $\rho$  прямо пропорциональна, а средняя длина пути  $\bar{\lambda}$  обратно пропорциональна давлению, скорость же молекул  $\bar{v}$  и удельная теплоёмкость газа  $c_v$  от давления не зависят. Однако при низких давлениях ( $\bar{\lambda} \gg d$ ) свободный пробег будет определяться расстоянием  $d$ , и тогда  $\kappa \sim p$ . В промежуточной области ( $\bar{\lambda} \approx d$ ) коэффициент теплопроводности постепенно понижается с давлением (хотя и не пропорционально давлению), так как всё большее число пролетают расстояние  $d$  без столкновений. На зависимость теплопроводности от давления влияют и размеры нагретого тела.

Если это тонкая нить радиуса  $r$  ( $r \ll d$ ), то коэффициент теплопроводности начинает заметно уменьшаться с давлением уже при  $\lambda \approx r$ .

Одним из типов тепловых манометров является терморпарный манометр. Манометр ВТ-2, выпускаемый нашей промышленностью, состоит из манометрической лампы ЛТ-2 и измерительного блока. Схема манометрической лампы ЛТ-2 показана на рис. 3. V-образная нить 1, через которую пропускают ток, служит нагревателем. Через тонкую соединительную проволочку 2 тепло передаётся терморпаре 3, выполненной в виде слегка пружинящих подвесов. Изменение температуры спая приводит к изменению термо-эдс, которая и измеряется.

Во время измерений ток нагревателя поддерживается постоянным. Температура нити определяется тепловым балансом. При протекании тока за единицу времени  $dt$  выделяется тепло

$$Q_0 = UI * dt$$

В равновесном состоянии такое же количество тепла должно уходить путём теплопроводности через газ на стенки лампы ( $Q_1$ ), через холодные концы нити ( $Q_2$ ) и излучаться с поверхности нити ( $Q_3$ ):

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Количество поступающего тепла  $Q_0$  постоянно, а уходящего  $Q_1 + Q_2 + Q_3$  растёт с ростом температуры нити. Чем ниже теплопроводность, тем выше температура, при которой наступает равновесие.

Предел измерений терморпарной лампой со стороны низких давлений определяется потерями тепла на теплоотдачу через концы нитей и на излучение. Когда  $Q_1 \ll Q_2 + Q_3$  теплопроводность газа перестаёт влиять на температуру

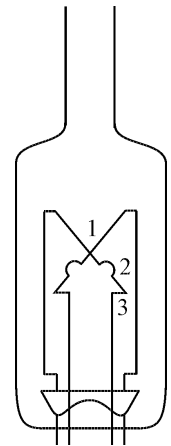


Рис. 3

нити. Для лампы ЛТ-2 этот предел равен  $10^{-3}$  тор. Со стороны высоких давлений предел измерений определяется тем давлением, при котором уже заметно изменение теплопроводности. Это давление порядка одного тора.

Таким образом с помощью термодпарной лампы можно измерять давление в пределах от 1 до  $10^{-3}$  мм ртутного столба. Весь диапазон измерений разделяется на две части. В первом диапазоне для измерения давления от 1 до  $2 \cdot 10^{-1}$  мм ртутного столба, когда теплопроводность газа велика, ток накала устанавливается больше, чем при измерении давления  $10^{-1} - 10^{-3}$  мм ртутного столба. Ток накала, который необходимо установить для каждого диапазона измерений, указан на каждой установке возле термодпарной лампы. Давление газа определяется по графику, в котором отражена зависимость термо-э.д.с. от давления газа.

Подробнее о работе с термодпарным вакуумметром читайте в инструкции, которая выдается в лаборатории.

## Порядок работы

### Задание 1. Знакомство с установкой

Ознакомьтесь на макете (макет имеется в комнате 218) с разобранным насосом. Определите по геометрическим размерам рабочий объем этого насоса и вычислите его теоретическую скорость откачки. Скорость вращения шкива насоса 540 об/мин.

Переведите кран  $K_1$  в положение "2" и включите форвакуумный насос. Через 1-2 минуты насос будет откачан и можно перевести кран  $K_1$  в положение "1" и откачивать установку. Приведите в рабочее состояние масляный и термодпарный манометры.

### Задание 2. Изучение характера газового разряда в зависимости от давления

Газовый разряд возникает между электродами, к которым приложено большое (несколько сот вольт) напряжение. Для этого в нашей работе применяется трансформатор Тесла. Он создает высокочастотное напряжение величиной в несколько киловольт. Описание трансформатора Тесла и правила работы с прибором даны в приложении.

Перед выполнением задания снимите фишку с цоколя лампы ЛТ-2, отсоединив ее тем самым от измерительного блока манометра (разряд трансформатора Тесла может повредить прибор). Для изучения разряда напустите в установку воздух, следя за давлением по масляному манометру и, соблюдая предосторожности, указанные на стр. 5, включите откачку. Поднесите трансформатор Тесла к незаземленному электроду разрядной трубки, включив его нажатием кнопки, и наблюдайте изменение характера разряда (в частности, цвета свечения) в зависимости от давления. Такой зависимостью часто пользуются для качественной оценки давления. Опишите ваши наблюдения.

### Задание 3. Определение объема установки

Метод определения объема вакуумной установки основан на использовании калибровочного объема. Напустите воздух в установку до некоторого давления  $P_1$ . Отключите калибровочный баллон от установки и откачайте оставшуюся часть до давления  $P_2$ . Прекратите откачку. Опять присоедините калибровочный баллон. Давление в установке изменится и станет равным  $P_3$ . Зная  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  вычислите объем установки. Формулы для расчета выведите самостоятельно.

### Задание 4. Определение зависимости скорости откачки от давления методом натекания

Натекание в установку осуществляется через краны  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$ . Открывая их по одному и в различных комбинациях, а также используя зажимы (см. рис. 2), можно получить разные скорости натекания. Открывать краны нужно при откачиваемой системе, следя за давлением по манометру. При этом установится некоторое давление  $P_{\text{пред}}$  для данной величины натекания. Измерьте его с помощью масляного или термодпарного манометра. Потом перекройте кран  $K_1$  и определите скорость натекания по скорости изменения уровня масла в манометре в зависимости от времени. Поделив скорость натекания (в *литрах · тор/сек*) на равновесное давление  $P_{\text{пред}}$  (в *торах*), получим скорость откачки насоса (в *литрах/сек*) при давлении равном равновесному.

Измерения проделайте для нескольких давлений  $P_{\text{пред}}$ .

Сравните полученные величины с вычисленной вами теоретической скоростью откачки. Чем определяется несовпадение результатов?

## Приложение. Трансформатор Тесла

Для качественного исследования разрежения в вакуумных стеклянных установках, а также для поисков течи, используется трансформатор Тесла. Тесла использовал для устройства резонансного трансформатора стоячие волны в катушках. Первичная обмотка трансформатора  $L_1$  (рис. 4) имеет небольшое число витков и входит в состав искрового колебательного контура, содержащего конденсатор  $C$  и искровой промежуток  $И$ . Вторичной обмоткой служит катушка  $L_2$  с большим числом витков.

Когда в первичной цепи возникают электрические колебания, то внутри катушки  $L_1$  появляется переменное магнитное поле, и во вторичной катушке  $L_2$  наводится переменная э.д.с. Если подобрать частоту колебаний в первичной цепи

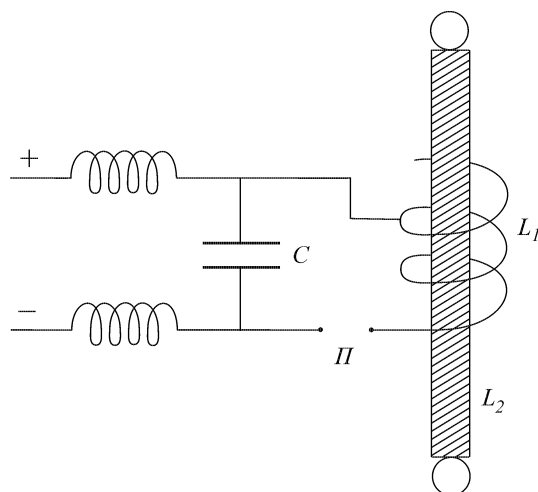


Рис. 4.

так, чтобы она совпадала с частотой одного из собственных колебаний (стоячих волн) катушки  $L_2$  (обычно - основного колебания), то вследствие резонанса в этой последней возникает интенсивная стоячая волна и между концами появится высокое переменное напряжение. При резонансе из концов вторичной катушки можно извлекать длинные искры, а электрическое поле вблизи катушки настолько сильно, что вызывает свечение газоразрядных трубок даже на значительном расстоянии от установки.

Вся схема трансформатора собрана внутри изолированного футляра, на конце которого имеется металлический стержень, соединенный с концом катушки  $L_2$ . Трансформатор нужно включить в цепь  $\sim 220$  вольт, и, взяв в руки, нажать на кнопку, держа металлическим стержнем **от себя**.

**При работе с трансформатором Тесла нельзя касаться металлических частей установки!!!**