



Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Физический факультет

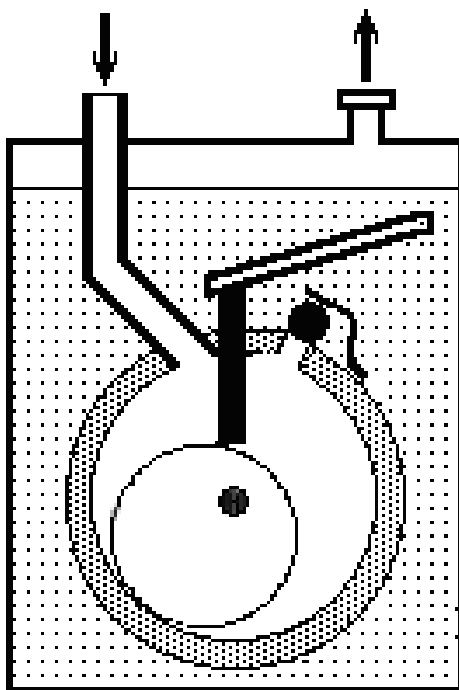
Кафедра общей физики

Киров С.А., Панчишин И.М., Русакова Н.Е., Салецкий А.М.

Лабораторный практикум по молекулярной физике

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Задача №201



Лабораторный практикум по молекулярной физике

Киров С.А., Панчишин И.М., Русакова Н.Е., Салецкий А.М.

Измерение длины свободного пробега молекул при низких давлениях

Учебное пособие – М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2015, 27 с.

Данное учебное пособие является описанием модернизированного варианта задачи, ранее существовавшей в практикуме физического факультета:

Булкин П. С., Попова И.И. Общий физический практикум. Молекулярная физика: учеб. пособие для студентов вузов. Под ред. А.Н. Матвеева, Д.Ф. Киселева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. Задача 6.1. *Получение и измерение вакуума.*

Новая экспериментальная установка собрана из современных вакуумных комплектующих. Рассмотрена элементарная теория протекания газа по трубам, существенная для понимания физики измерений. Описан принцип работы современных вакуумных датчиков давления, механических насосов и других элементов вакуумных систем.

Пособие предназначено для студентов физического факультета МГУ и для преподавателей, ведущих занятия в практикуме.

Оглавление

Теоретическое введение.....	3
<i>Физический вакуум</i>	3
<i>Получение вакуума. Основные характеристики вакуумной техники</i>	4
<i>Вакуумные насосы</i>	6
<i>Протекание газа по трубам (капиллярам)</i>	11
Экспериментальная часть.....	16
<i>Экспериментальная установка</i>	16
<i>Выполнение эксперимента</i>	20
<i>Упражнение 1. Определение скорости откачки насоса и длины свободного пробега</i>	20
<i>Упражнение 2. Определение предельного вакуума, создаваемого насосом, и скорости натекания воздуха в рабочий сосуд</i>	22
Обработка результатов	24
<i>Параметры установки</i>	26
Контрольные вопросы.....	27
Литература.....	27

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Цель работы

Целью данной работы является: нахождение длины свободного пробега молекул воздуха в зависимости от давления, изучение принципов работы вакуумных насосов и установок; измерение низких давлений газа вакуумметрами.

Теоретическое введение

Физический вакуум

Вакуум в переводе с латыни означает пустота. *Абсолютный вакуум*, отвечающий точному переводу слова, при котором в данном объеме пространства нет ни одной молекулы никакого вещества, недостижим. Это физическая модель, такая же, как идеальный газ, абсолютно твердое тело и так далее. В физике вакуумом принято называть такое состояние газа в сосуде, при котором длина свободного пробега молекул газа стала равна или больше линейного размера сосуда, то есть молекула испытывает соударения преимущественно только со стенками сосуда. При этом понятие вакуума относительно, так как связано с размером сосуда.

Когда давление газа уменьшается настолько, что длина свободного пробега молекул оказывается больше размеров сосуда, поведение газа меняется. В частности, теряют свой смысл коэффициенты внутреннего вязкого трения, теплопроводности и диффузии, поскольку они вводились для описания процессов переноса только за счет столкновений молекул друг с другом. В вакууме, в отличие от более высоких давлений, теплопередача между стенками сосуда и силы трения, возникающие при их относительном движении, обнаруживают зависимость от давления. Особенности вакуума могут проявиться и при атмосферном давлении, например, при пропускании газа сквозь пористые перегородки с размером пор около 10^{-7} м. Но в большинстве случаев свойства вакуума проявляются, начиная с давлений $1 - 10^{-3}$ мм. рт. ст.

Длиной свободного пробега молекулы λ называют среднее расстояние, которое пролетает молекула газа между двумя последовательными соударениями. Величина λ является случайной величиной. В данной работе определяется среднее значение длины свободного пробега, которое в кинетической теории газа определяется формулой

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}, \quad (1)$$

здесь σ – сечение рассеяния молекул газа, n – концентрация молекул, d – газокINETический диаметр молекулы. Так как концентрация n прямо пропорциональна давлению газа p , то из соотношения (1) следует, что величина λ зависит от давления газа p обратно пропорционально.

В вакуумной технике различают высокий, средний и низкий вакуум. Пусть линейный размер сосуда равен a . Состояние газа, при котором величина (1) (заметьте, в этом случае величина, определяемая формулой (1) — *не длина свободного пробега* газа, находящегося в данном конкретном сосуде) намного больше размера сосуда ($\lambda \gg a$), называется «высоким вакуумом». Величина $Kn = \lambda/a$ называется числом Кнудсена (в честь датского ученого Мартина Кнудсена (1871–1949)). Соответственно, средний вакуум характеризуется $Kn \sim 1$, а низкий, когда $Kn \ll 1$.

Степень вакуума влияет на различные физические характеристики газа. Например, теплопроводность газа при низком вакууме не зависит от давления газа, а при высоком зависит (и конечно, чем выше степень вакуума, тем ниже теплопроводность).

Получение вакуума. Основные характеристики вакуумной техники

Для создания вакуума используются насосы различных типов. Разные типы насосов используются для получения различных степеней вакуума в зависимости от условий эксплуатации.

Но в любом случае необходимо создать поток газа наружу из откачиваемого объема. Существуют характеристики, общие для всех насосов.

Скорость действия насоса (скорость откачки) — объем газа, откачиваемый за единицу времени при данном давлении газа на входе в насос

$$S_p = \frac{dV}{dt}. \quad (2)$$

Скорость откачки обычно измеряется в л/с или м³/час.

Количество газа в вакуумной технике удобно и принято измерять в виде произведения давления газа на объем

$$Q = pV. \quad (3)$$

По закону Менделеева-Клапейрона масса газа $m = \frac{\mu}{RT} pV = \frac{\mu}{RT} Q$. Если температура T постоянна, что практически всегда соблюдается в вакуумных системах, то величина m действительно пропорциональна Q . Величина Q формально имеет размерность Джоуль, а единица измерения массы численно равна $\frac{\mu}{RT}$.

Поток газа (в сечении трубопровода) — количество газа, проходящего через данное сечение трубопровода с давлением p за единицу времени (его иногда называют производительностью вакуумной системы в данном месте трубопровода)

$$I = \frac{dQ}{dt} = p \cdot S_p. \quad (4)$$

Соответственно,

$$S = \frac{I}{p_{ex}}, \quad (5)$$

где p_{ex} — давление на входе в насос. При достигаемом минимальном давлении $p_{вх.мин}$ скорость откачки обращается в нуль. Это давление называется предельным давлением или *предельным вакуумом*.

Используют также величину L — *проводимость трубопровода*, как отношение потока газа к разности давлений на его концах

$$L = I / (p_1 - p_2). \quad (6)$$

Вакуумные насосы

Существует три основных класса вакуумных насосов:

Механические вакуумные насосы. Откачивающее действие их основано на перемещении газа вследствие механического перемещения рабочих частей насоса.

Струйные вакуумные насосы. Основаны на увлечении, удалении газа струёй жидкости, пара или газа.

Поглотительные (сорбционные или криогенные) вакуумные насосы. Основаны на поглощении с помощью процессов сорбции или конденсации ионизированного газа, испарении поглотителей или охлаждении их до криогенных температур.

В современных вакуумных установках и системах, когда не требуется особо высокий вакуум, применяются в основном механические вакуумные насосы.

Классификация механических вакуумных насосов:

По области действия: Низкого; среднего; высокого вакуума.

По принципу действия: объёмные; скоростные.

Объёмный механический вакуумный насос – насос, у которого перемещение газа осуществляется за счёт периодического изменения объёма рабочей камеры.

Скоростной вакуумный насос – откачивающееся действие его основано на передаче газу импульса от вращающегося рабочего колеса в сторону откачки.

По конструкции рабочих органов: поршневые; пластинчато-роторные; пластинчато-статорные; золотниковые; винтовые; двухроторные; жидкостнокольцевые; осевые; центробежные.

Для создания низкого вакуума в основном применяются механические пластинчато-статорные и пластинчато-роторные вакуумные насосы (чаще всего пластинчато-роторные). Рассмотрим работу этих двух типов механических вакуумных насосов.

Механический пластинчато-статорный насос. Схема насоса приведена на *рис.1*. В цилиндрической камере 1 вращается эксцентричный ротор 2. Газ засасывается через отверстие 3 и выталкивается в масло 5, которым залита камера насоса, через клапан 4, состоящий из шарика, прижатого пружиной. Пластина 6 скользит вдоль прорези в стенке камеры и при этом плотно прижимается к внешней поверхности ротора пружиной.

Процесс откачки происходит следующим образом (*рис. 1*). Положение *а* - ротор находится в исходном состоянии. Положение *б* - ротор подвинулся вниз, и в камере создается разрежение со стороны впускного отверстия. Через это отверстие газ поступает из откачиваемой системы. Одновременно происходит сжатие газа в сторону выпускного клапана. Положение *в* - происходит дальнейшее всасывание газа из вакуумной системы и выход сжатого газа через выпускной клапан.

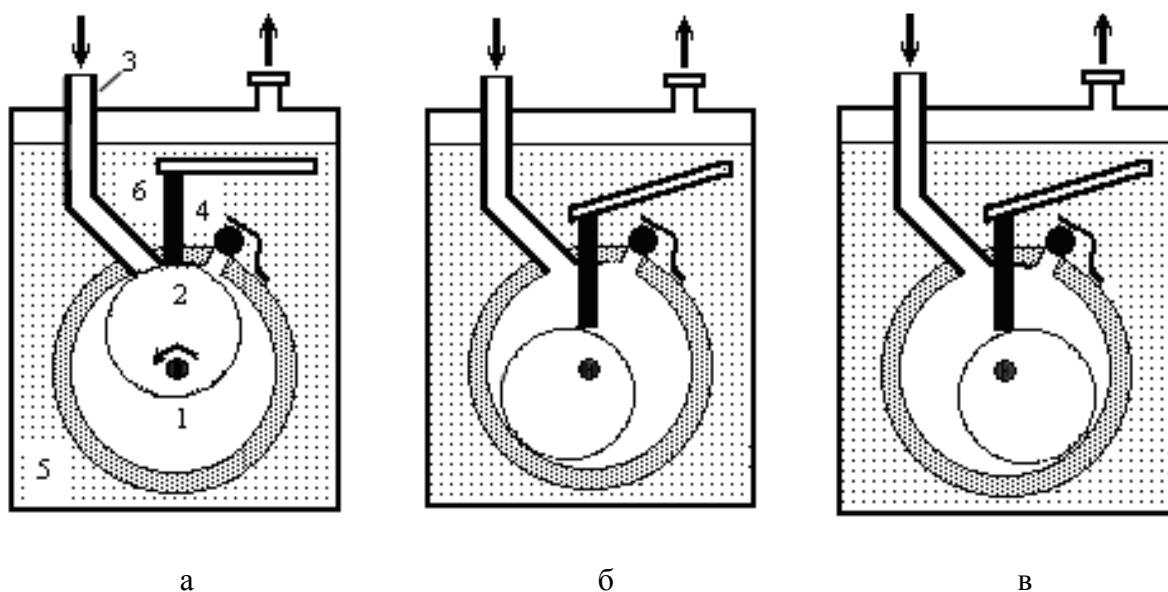


Рис.1. Схема пластинчато-статорного насоса

Пластинчато-роторный вакуумный насос. В пластинчато-роторных вакуумных насосах маслозаполненного типа (*рис.2*) внутри цилиндрической расточки

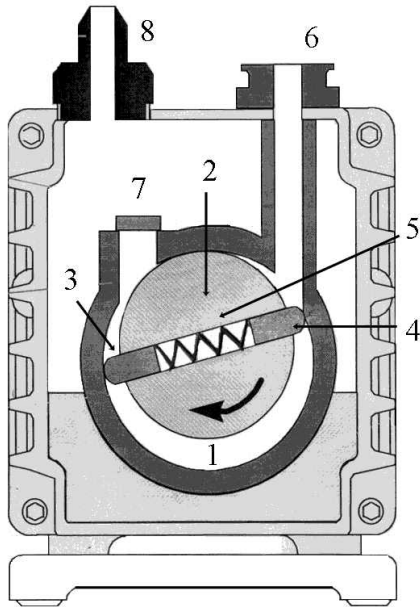


Рис.2. Устройство пластинчато-роторного вакуумного насоса

корпуса 1 эксцентрично расположен цилиндрический ротор 2. В пазу ротора размещены две пластины 3 и 4 с пружиной 5 между ними. При вращении ротора пластины центробежными силами и силой упругости пружины прижимаются к внутренней расточке корпуса. Насос подключается к откачиваемой системе через впускной патрубок 6. В результате увеличения объема на стороне впуска создается разрежение и откачиваемый газ из камеры засасывается в вакуумный насос. На стороне выпуска газ сжимается и при давлении, превышающем давление пружины выпускного клапана 7, выбрасывается из насоса.

Рассмотрим работу этого насоса. Полезный объем рабочей камеры можно разделить на три полости (*рис.3 а*): I — полость всасывания, II — полость перемещения и частичного сжатия газа, III — полость вытеснения газа.

При вращении ротора в направлении, указанном стрелкой, полость I увеличивается и дополнительное количество газа из откачиваемого сосуда по впускному каналу поступает в рабочую камеру насоса. Полость II уменьшается в объеме, в ней происходит сжатие газа. Полость III уменьшается, и газ из нее через выпускной канал под клапаном вытесняется из насоса. При положении ротора, изображенном на *рис.3 б*, заканчивается вытеснение газа из полости III. При дальнейшем вращении ротора полость II переходит в полость III, т. е. наступает момент, когда становится возможным вытеснение следующей порции газа (*рис.3 в*). В положении ротора, изображенном на *рис.3 г*, полости I и II общаются между собой. Лишь когда ротор повернется на 180° от начального положения и займет положение, тождественное исходному (*рис.3, а*), происхо-

дит разделение полостей I и II и от откачиваемого объема отделяется очередная порция газа. В этот момент полость II имеет наибольший объем. В пластинчато-роторном насосе за один оборот ротора происходят два цикла откачки, т. е. отделяются от откачиваемого объема и вытесняются из насоса две порции газа.

У лучших одноступенчатых насосов полное остаточное давление зависит от состава и состояния масла и достигает $(1-5) \cdot 10^{-2}$ мм

рт. ст. Гораздо лучшие показатели имеют двухступенчатые насосы, у которых выход первой ступени соединен со входом для второй. В двухступенчатых насосах для уменьшения потерь между первой и второй ступенями их соединяют каналом *a* (рис.4), геометрические размеры ступеней одинаковы, но пластины смещены одна относительно другой на 90° .

На рис.5 представлена pV -диаграмма цикла работы механического насоса (на примере пластинчато-статорного насоса, рис.1). При давлении $P_{вх}$ газ засасывается в камеру 1 до объема V_0 (процесс 1–2 на рис.5). Затем камера отделяется от входа 3 ротором 2, и газ адиабатически сжимается до давления $P_{вых}$ (процесс 2–3) и при постоянном давлении (изобарически) проталкивается через клапан 4 (процесс

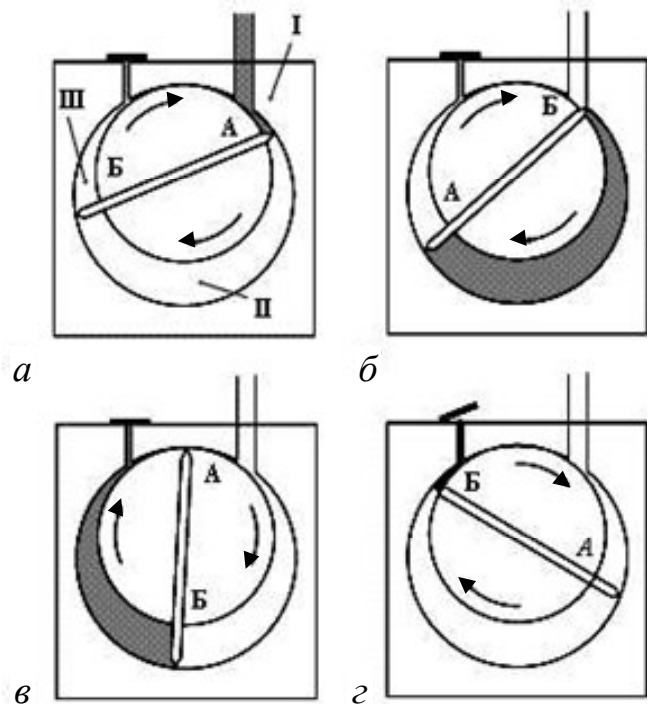


Рис.3. Схема работы пластинчато-роторного насоса

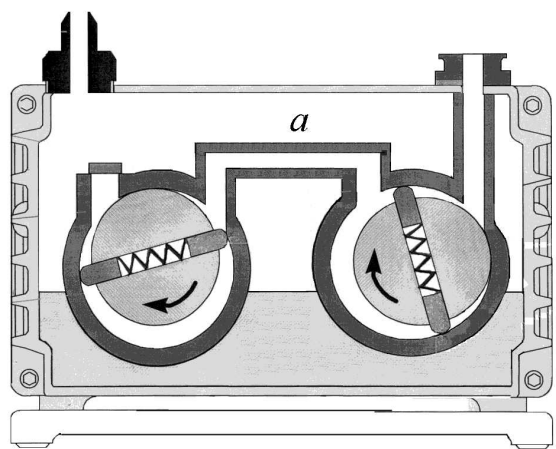


Рис.4. Устройство двухступенчатого пластинчато-роторного вакуумного насоса

3–4). Некоторое количество газа при этом всегда остается под клапаном. Объем его V_x , а давление $P_{\text{вых}}$. Это остаточный или "вредный" объем.

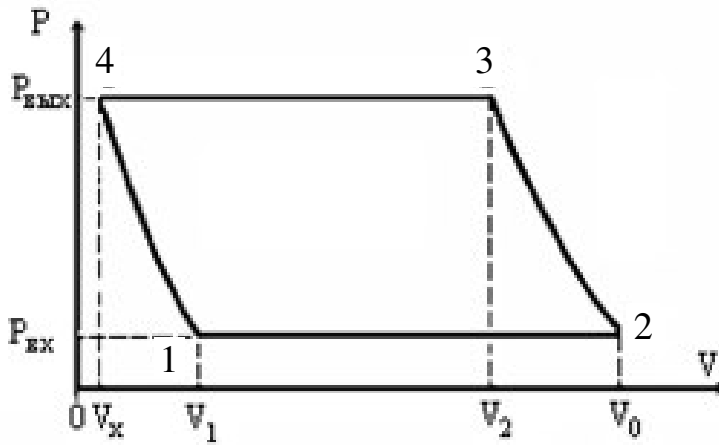


Рис.5. Цикл работы механического пластинчато-статорного насоса

При дальнейшем движении ротора 2 происходит засасывание новой порции газа через патрубков 3, но в камере оказывается и газ остаточного объема V_x , который при давлении $P_{\text{вх}}$ занимает объем V_1 , расширившись адиабатически (процесс 4–1).

В результате за каждый цикл работы насоса откачивается количество газа, равное $Q = P_{\text{вх}}(V_0 - V_1)$. Если за 1 с насос совершает n циклов, то поток газа равен $I = n \cdot P_{\text{вх}}(V_0 - V_1)$. И скорость откачки $S = n \cdot (V_0 - V_1)$. Выражая V_1 из уравнения адиабаты, получим для скорости откачки

$$S = nV_0 \left[1 - \left(\frac{V_x}{V_0} \right) \cdot \left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \right)^{1/\gamma} \right]. \quad (7)$$

Отсюда можно найти предельное давление, при котором скорость откачки обращается в нуль:

$$P_{\text{вх.л.}} = \left(\frac{V_x}{V_0} \right)^\gamma \cdot P_{\text{вых}}. \quad (8)$$

Для двухступенчатого насоса скорость откачки и предельное давление p_{min} определяются формулами

$$S = nV_0 \left[1 - \left(\frac{V_x}{V_0} \right) \cdot \left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \right)^{1/2\gamma} \right]. \quad (9)$$

$$p_{\text{min}} = \left(\frac{V_x}{V_0} \right)^{2\gamma} \cdot P_{\text{вых}}.$$

Подставляя последнюю формулу в (9), получаем для двухступенчатого насоса

$$S(p_{ex}) = nV_0 \left[1 - \left(\frac{p_{min}}{p_{ex}} \right)^{1/2\gamma} \right]. \quad (10)$$

Протекание газа по трубам (капиллярам)

В данной работе длина свободного пробега молекул газа находится опосредованно из экспериментальных данных протекания газа через капилляр.

В условиях вакуума характер протекания газа по трубам начинает зависеть от соотношения длины свободного пробега λ и диаметра трубы D . Обычно выделяют три режима.

1) *вязкостное течение*, когда $\lambda \ll D$ (низкий вакуум). В этом случае сопротивление протеканию газа обусловлено вязкостью газа, т.е. передачей импульсов от молекулы к молекуле.

2) *молекулярное течение*, когда $\lambda \gg D$ (высокий вакуум). В этом случае молекулы почти не сталкиваются между собой и взаимодействуют только со стенками трубы.

3) Промежуточный (молекулярно-вязкостный) режим течения ($\lambda \sim D$).

Вязкостное течение. Это случай низкого вакуума, который и в основном и реализуется в нашей установке.

Рассмотрим сначала движение несжимаемой среды (жидкости) через капилляр. При малых скоростях потока течение в капилляре является *ламинарным*, т.е. поток движется отдельными слоями, и его скорость в каждой точке направлена вдоль оси капилляра. Такое течение устанавливается на некотором расстоянии от входа в капилляр, поэтому для достижения достаточной точности эксперимента необходимо выполнение условия $R \ll l$, где R — радиус, l — длина капилляра.

Рассмотрим подробнее течение в круглом капилляре диаметром $2R$ при ламинарном течении. Выделим воображаемый цилиндрический объем радиусом R

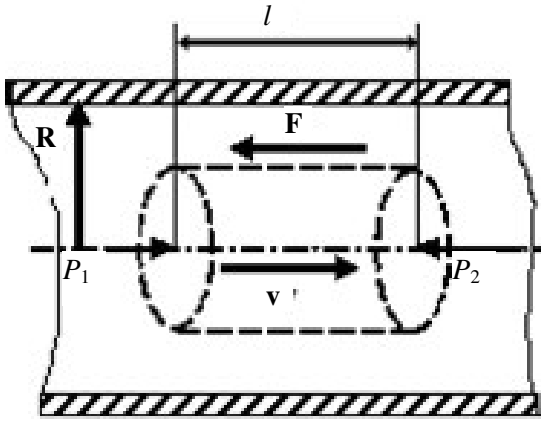


Рис.6. Течение жидкости в круглом капилляре

и длиной l , как это показано на рис.6. Пусть давление на торцах цилиндра через P_1 и P_2 . При установившемся течении вектор скорости в каждой точке канала не меняется со временем. Тогда сила давления на выбранный объем $(P_1 - P_2)\pi r^2$, действующая в направлении течения, уравновешивается силой внутреннего трения F , действующей со стороны наружных слоев газа:

$$(P_1 - P_2)\pi r^2 = F. \quad (11)$$

Сила внутреннего трения определяется по формуле Ньютона:

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dr} \right| S,$$

где $S = 2\pi r l$ – площадь боковой поверхности цилиндра, v – скорость потока, η – коэффициент вязкости среды.

Вследствие трения скорость среды убывает с увеличением расстояния от оси капилляра. Следовательно, величина $\frac{dv}{dr}$ отрицательна и $\left| \frac{dv}{dr} \right| = -\frac{dv}{dr}$. Исходя

из этого, силу внутреннего трения можно представить в виде:

$$F = -\eta \frac{dv}{dr} 2\pi r l. \quad (12)$$

Подставив (12) в (11) и разделив переменные, проинтегрируем получившиеся уравнение считая, что сила внутреннего трения о стенку капилляра полностью тормозит прилегающий к ней слой среды, т.е. $v(R) = 0$

$$\int_v^0 dv = -\frac{P_1 - P_2}{2l\eta} \int_r^R r dr.$$

Получаем параболический закон изменения скорости газа по радиусу канала:

$$v = \frac{\Delta P}{4\eta l} (R^2 - r^2), \quad (15)$$

где $\Delta P = P_1 - P_2$.

Вычислим теперь объемный расход (объем, протекающий за единицу времени через поперечное сечение капилляра). Разобьем поперечное сечение капилляра на кольца шириной dr (рис.7). Объемный расход через кольцо радиусом r можно представить в виде

$$I_V = \frac{dV}{dt} = v dS = \frac{\Delta P}{4\eta l} (R^2 - r^2) 2\pi r dr.$$

Объемный расход через все сечение капилляра будет равен

$$I_V = \frac{\pi \Delta P}{2\eta l} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr.$$

Интегрируя это соотношение, получаем *формулу Пуазейля* для объемного расхода несжимаемой среды:

$$I_V = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\eta l}. \quad (16)$$

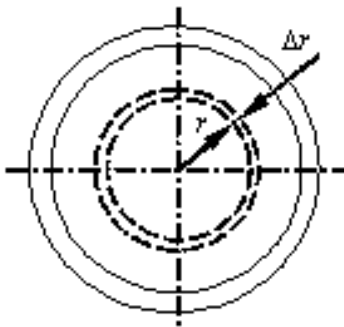


Рис.7. К вычислению
объемного расхода

Массовый расход среды I_m , т.е. массу, проходящую за единицу времени через любое поперечное сечение капилляра, можно получить, умножив объемный расход на плотность

$$I_m = \frac{dm}{dt} = \rho I_V = \rho \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\eta l}. \quad (17)$$

Рассмотрим теперь изотермическое течение по капилляру сжимаемой среды – газа. Поскольку в этом случае плотность среды $\rho(p)$ зависит от давления и меняется вдоль потока, выделим сначала на капилляре бесконечно малый отрезок dx , в пределах которого плотность ρ можно считать постоянной. Тогда для потока массы через выбранное сечение формула (17) дает

$$I_m = \frac{dm}{dt} = \rho(p) \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{dp}{dx}, \quad (18)$$

где r – радиус капилляра, η – динамическая вязкость газа, которую считаем не-

зависимой от давления. Найдем плотность газа из уравнения состояния Менделеева-Клапейрона

$$\rho = \frac{\mu p}{RT} \quad (19)$$

(μ – молярная масса газа) и, подставив в (18), получим после деления переменных

$$\frac{dm}{dt} dx = \frac{\pi r^4 \mu}{8\eta RT} p dp.$$

Проинтегрируем это соотношение по длине капилляра, учитывая, что при стационарном течении массовый поток одинаков во всех сечениях

$$\frac{dm}{dt} \int_0^l dx = \frac{\pi r^4 \mu}{8\eta RT} \int_{p_1}^{p_2} p dp.$$

Получаем

$$I_m = \frac{\pi r^4 \mu}{16\eta RT} \frac{p_1^2 - p_2^2}{l}. \quad (20)$$

Определенный в (4) в соответствии с вакуумной терминологией поток газа I получается из (20) нормировкой массового потока на μ/RT

$$I = \frac{dQ}{dt} = I_m \frac{RT}{\mu} = \frac{\pi r^4}{16\eta} \frac{p_1^2 - p_2^2}{l}. \quad (21)$$

Таким образом, если экспериментально измерить поток I через капилляр и давления p_1, p_2 на его концах, то из (21) можно найти коэффициент динамической вязкости газа

$$\eta = \frac{\pi r^4}{16I} \frac{p_1^2 - p_2^2}{l}. \quad (22)$$

Сам коэффициент динамической вязкости определяется формулой

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \lambda, \quad (23)$$

где ρ – плотность газа (19), λ – средняя длина свободного пробега молекул, $\langle v \rangle$ – средняя скорость молекул газа

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}. \quad (24)$$

Отсюда можно рассчитать длину свободного пробега молекул при давлениях p_1 и p_2 в начале ($\lambda = \lambda_1$) и в конце ($\lambda = \lambda_2$) капилляра соответственно

$$\lambda_i(p) = \frac{3\eta}{\rho \langle v \rangle} = \frac{3\eta}{\langle v \rangle} \frac{RT}{p_i \mu}, \quad (25)$$

$i = 1, 2$. Необходимый для расчета поток I через капилляр в процессе откачки можно легко определить, если откачивать через капилляр сосуд известного объема V , измеряя зависимость давления в нем от времени $p_1(t)$. В каждый момент времени поток равен скорости уменьшения количества газа в сосуде:

$$I(t) = -\frac{dQ}{dt} = -V \frac{dp_1(t)}{dt}. \quad (26)$$

2) **Молекулярное течение** $\lambda \gg D$ (течение Кнудсена). В этом случае понятие вязкости неприменимо, так как столкновениями молекул друг с другом можно пренебречь. Поэтому полный поток молекул через трубу равен разности двух встречных независимых потоков. Его величина определяется формулами Кнудсена, которые для случая изотермического течения через круглую трубу имеют вид ([2], § 96)

$$\frac{dN}{dt} = \frac{2}{3} \pi r^3 \langle v \rangle (n_1 - n_2),$$

где $n_{1,2}$ – концентрации молекул на концах трубы. Поток газа будет

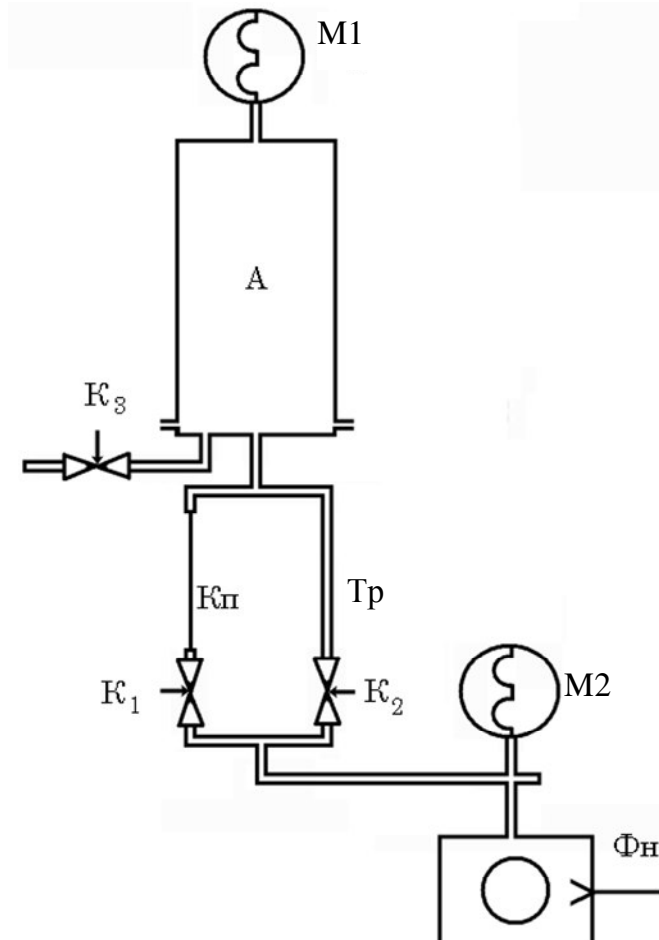
$$I = \frac{dQ}{dt} = I_m \frac{RT}{\mu} = m \frac{dN}{dt} \frac{RT}{\mu} = \frac{2}{3} \frac{\pi r^3}{N_A} \langle v \rangle \frac{p_1 - p_2}{l},$$

где m – масса молекулы газа, N_A – число Авогадро. Зависимость потока от радиуса трубы и давлений здесь существенно иная, чем в случае вязкостного потока.

Экспериментальная часть

Экспериментальная установка

Блок-схема экспериментальной установки представлена на *рис.8*. Установка



включает в себя механический форвакуумный насос ФН, рабочий объем A , капилляр Кп, трубу Тр и вакуумметры М1 и М2. Все элементы установки соединяются трубопроводами из нержавеющей стали и клапанами (кранами) К1, К2, К3.

В качестве вакуумного насоса применяется двухступенчатый пластинчато-роторный насос с производительностью около $5,8 \text{ м}^3/\text{ч}$. В этом насосе для уплотнения между элементами в рабочей камере используется масло. Откачной механизм приводится в действие напрямую однофазным электродвигателем через гибкую муфту. Наличие на входе быстродействующего обратного клапана позволяет избежать попадания масла в вакуумную систему при отключении насоса. Внешний вид насоса представлен на *рис.9*. Общий вид установки показан на *рис.10*.

Рис.8. Блок-схема экспериментальной установки

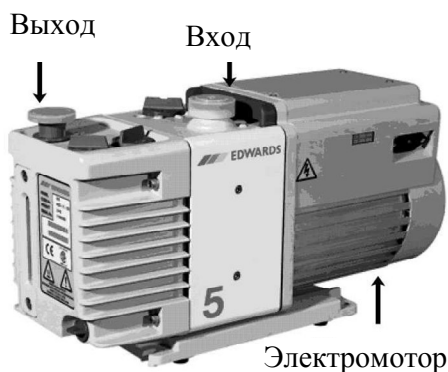


Рис.9. Вакуумный пластинчато-роторный насос RV5.

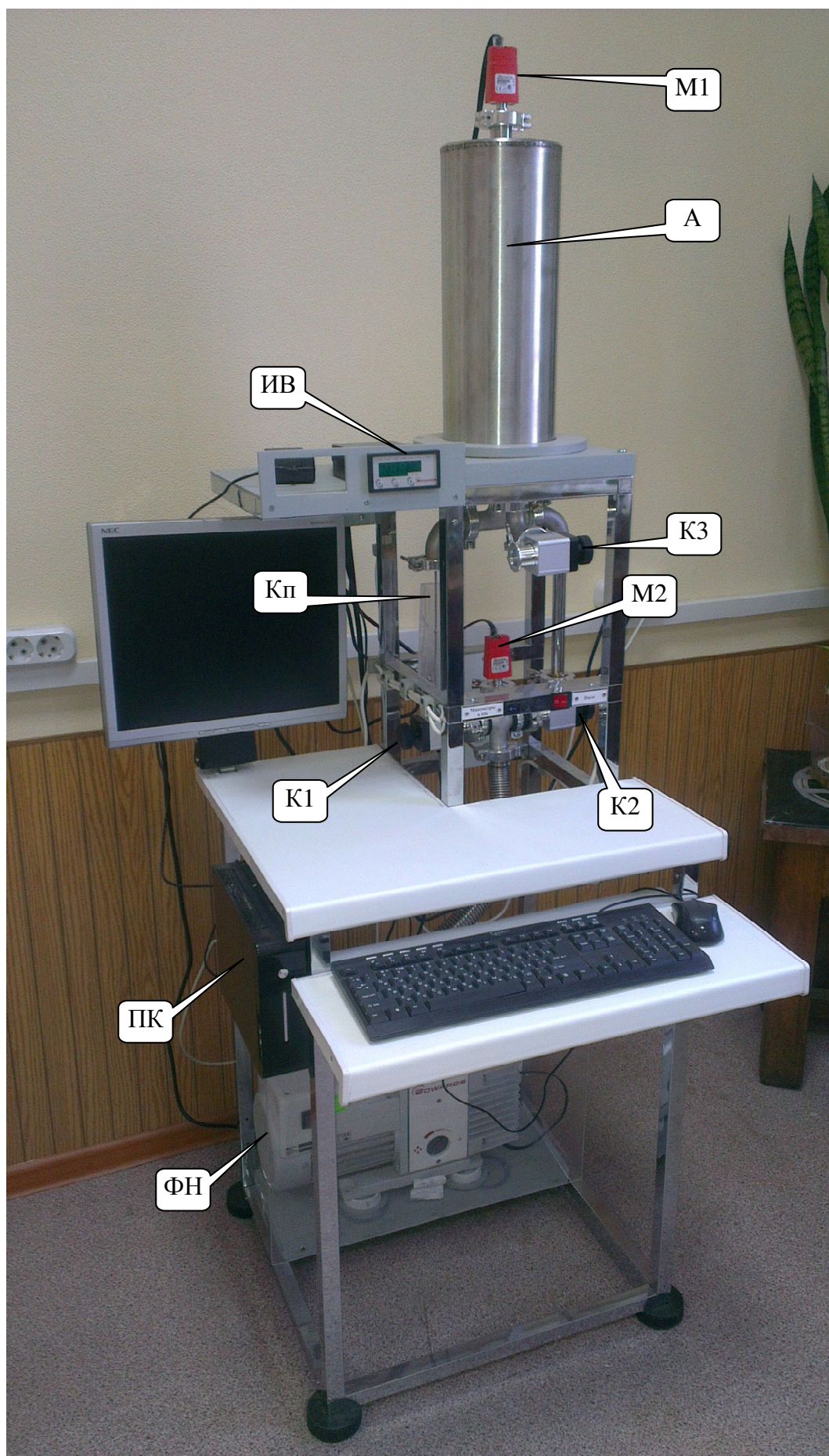


Рис. 10. Внешний вид экспериментальной установки в интерьере лаборатории



Рис. 11. Монтаж трубопроводов серии KF

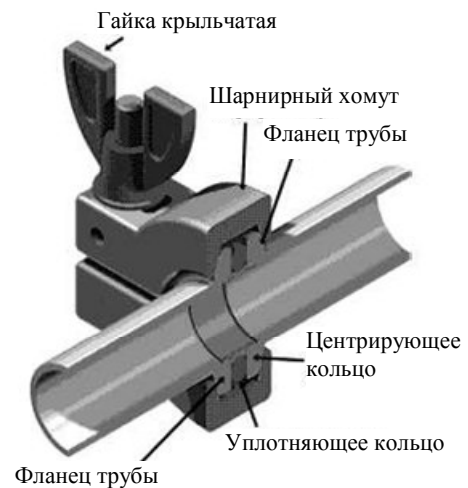
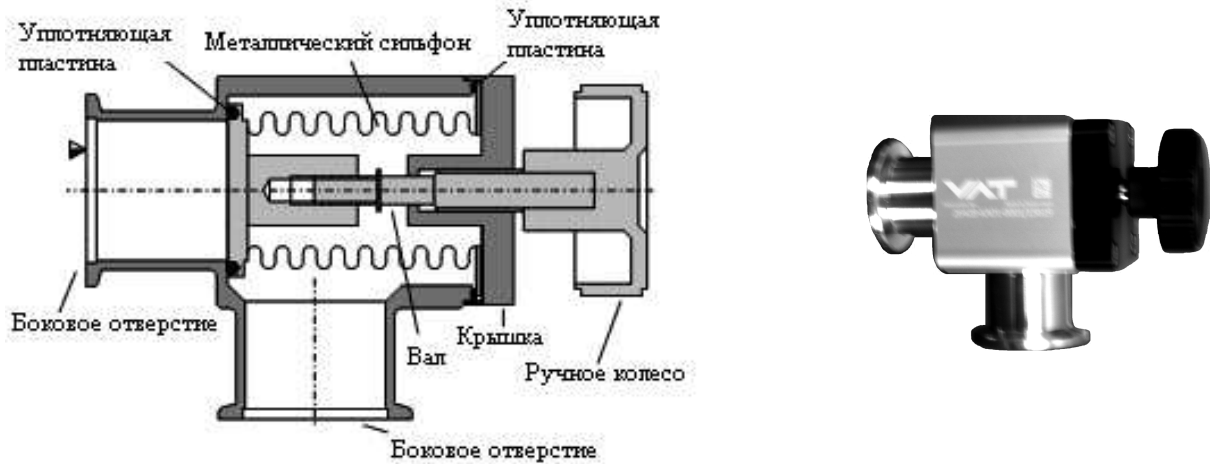


Рис. 12. Сопряжение поверхностей фланцев

Все элементы установки соединяются трубопроводами из нержавеющей стали. Используемая здесь современная схема соединения фланцев показана на *рис. 11*. Ввиду наличия хомута с быстрым зажимом вакуумные соединения можно быстро соединять и разъединять вручную без инструментальных средств. Сжатие фланцев происходит из-за давления хомута на конические поверхности фланцев, скошенные под углом 15 градусов. Сопряженные поверхности фланцев сжимают уплотняющее кольцо (закрепленное с помощью металлического центрирующего кольца) для создания вакуумного уплотнения (*рис. 12*).

В качестве вакуумных кранов К1-К3 применяется угловые клапаны VAT Series 26, встраиваемые в вакуумный трубопровод и обеспечивающие герметичные отсечения частей системы друг от друга. Схема углового клапана представлена на *рис. 13а*, а его внешний вид на *рис. 13 б*. У углового клапана поток газа на выходе перпендикулярен потоку на входе. Данный тип клапана не предназначен для регулирования потока, т.к. имеет только 2 рабочих положения – полностью открыт или закрыт. Клапаны К1, К2 служат для коммутации откачки баллона А через капилляр Кп или через трубу Тр. Клапан К3 используется для запуска воздуха в баллон А.



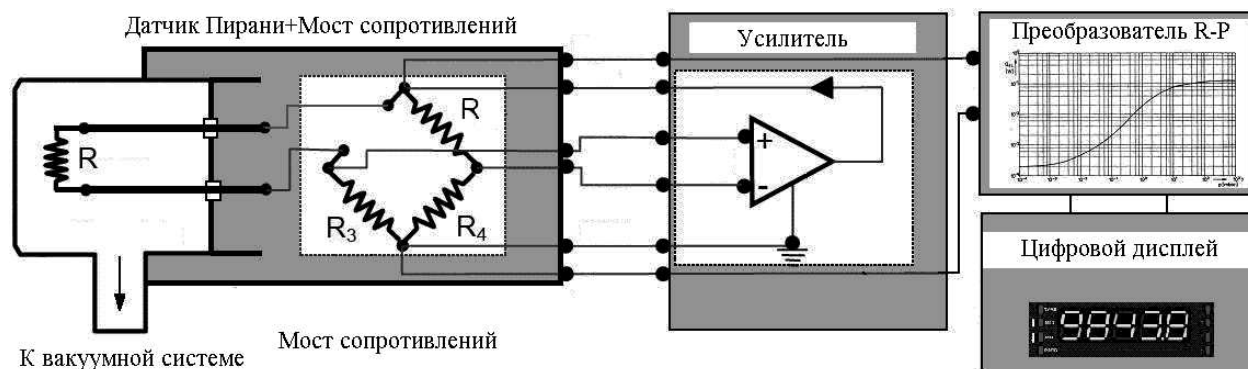
a

б

Рис.13. Устройство углового вакуумного клапана VAT Series 26 (*a*) и его внешний вид (*б*).

Для герметичного уплотнения в угловом клапане применяется металлический сиффон. Открытие клапана происходит посредством вращения ручного колеса против часовой стрелки. При этом шток втягивается, и клапан открывается. Закрытие происходит при вращении ручки по часовой стрелке до конца.

В качестве манометра в экспериментальной установке применяется датчик вакуума Пирани (этот тип манометра был впервые сконструирован Марчелло Пирани, 1906 г.) (*рис.14*). Принцип его работы основан на зависимости теплоотдачи тонкой проволоки от давления окружающего газа. Проволока нагревается протекающим через нее постоянным током и охлаждается окружающим газом. При уменьшении давления газа теплоотдача уменьшается, и температура проволоки увеличивается. Температуру можно найти по сопротивлению проволоки R , измеряя приложенное к ней напряжение и текущий ток. Для увеличения чувствительности сопротивление R обычно включается в плечо моста сопротивлений. Изменение R приводит к разбалансировке моста, в результате на его выходе появляется напряжение, которое усиливается усилителем (*рис.14 а*) и специальным нелинейным преобразователем преобразуется в величину давления в цифровом коде. Результат подаётся на цифровой дисплей и на контроллер Com-порта (RS-232) для передачи данных в компьютер. Внешний вид датчика Пирани APG100-XM представлен на *рис.14 б*.



a



б

Рис.14. Устройство датчика давления Пирани (*a*) и его внешний вид (*б*).

В процессе откачки давление, измеряемое датчиком М1 вверху вакуумной камере А, практически равно давлению на верхнем конце капилляра (разумеется, в статике они точно равны). Давление на нижнем конце капилляра измеряется датчиком М2.

Персональный компьютер (*рис.10*, ПК) используется для регистрации экспериментальных данных. Программа измерений выдает на экран зависимость от времени давлений на датчиках М1 и М2 в логарифмическом масштабе. Результаты можно посмотреть на экране в виде таблицы и сохранить в виде текстового файла на внешний носитель.

Выполнение эксперимента

Упражнение 1. Определение скорости откачки насоса и длины свободного пробега

Скоростью откачки насоса называется количество откачанного за единицу времени газа, отнесенное к входному давлению насоса $S = (dQ/dt)/p_{\text{вх}}$.

Для измерения скорости откачки и длины свободного пробега рабочий объем откачивается через капилляр с одновременной регистрацией давления $p_1(t)$ на верхнем конце капилляра (датчик М1) и давления $p_2(t)$ – на нижнем (датчик М2).

Включение установки. Включить вакуумметр, подав на него питание левой клавишей "Манометры" на каркасе установки. Убедиться, что вакуумметр установлен на измерение давления в паскалях, в противном случае установить данный режим кнопками на его передней панели.

Включить компьютер кнопкой на его корпусе. После загрузки операционной системы автоматически появится окно программы регистрации экспериментальных данных. Программа управляется с помощью команд и кнопок меню, имеющего следующий вид

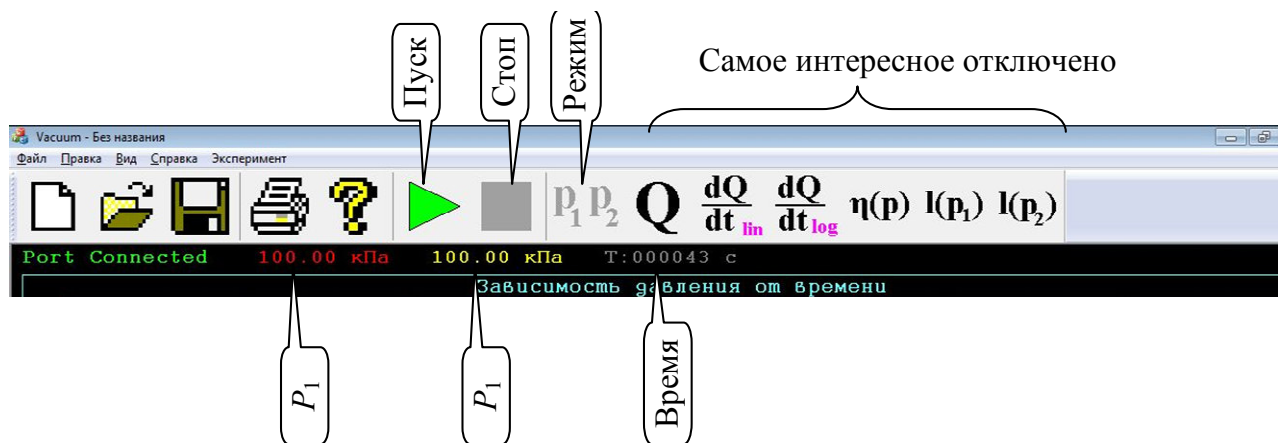



Рис.15. Меню рабочей программы.

В режиме p_1p_2 программа регистрирует оба давления в зависимости от времени.

Измерения

Впустить воздух в систему. Для этого закрыть клапан K_2 (повернуть ручку по часовой стрелке до упора) и открыть клапаны K_1 и K_3 (повернуть их ручки против часовой стрелки). Убедившись, что оба манометра показывают атмосферное давление (10^5 Па), закрыть клапан K_3 .

Внимание. При закрывании данных клапанов с винтовой подачей заглушки достаточно небольшого вращающего усилия. Приложенный слишком большой момент сил не улучшит герметичность закрытия, но гарантированно приведет к повреждению резьбы и поломке клапана.


Начать откачку откачки баллона А через капилляр. Для этого, еще раз проверив, что клапан K_2 закрыт, включить начало регистрации данных рабочей программой, нажав мышью кнопку  на дисплее. Убедившись по экрану монитора, что регистрация зависимости давлений $p_1(t)$ и $p_2(t)$ от времени началась, включить насос светящейся кнопкой "Насос" на каркасе установки. Откачку вести до тех пор, пока $p_2(t)$ не достигнет величины около 1-2 Па, что занимает приблизительно 10-15 минут. Не выключая насоса, перейти к следующему упражнению.

Упражнение 2. Определение предельного вакуума, создаваемого насосом, и скорости натекания воздуха в рабочий сосуд

Скорость натекания через вакуумные уплотнения системы зависит от разности внешнего (атмосферного) давления p_A и давления в сосуде p_1 . Поскольку при достижимом в нашей установке вакууме $p_1 / p_A \sim 10^{-4} \dots 10^{-5}$, то скорость натекания не зависит от p_1 , т.е. практически постоянна и давление в сосуде должно возрасти линейно. Так как натекание мало, его лучше измерять при самых малых давлениях в рабочем сосуде. Для этого надо напрямую подключить насос к рабочему сосуду через трубу Tr большого диаметра, открыв кран K_2 . Наблюдая на экране процесс откачки, дождаться минимального давления (около 5 минут откачки). После этого закрыть оба крана K_1 и K_2 .

Поскольку теперь все клапаны закрыты, откачка ведется из минимально возможного объема, в который входят только трубы от насоса до клапанов K_1 и K_2 , и давление в котором p_2 измеряется манометром M_2 . Установившееся

(около 5 минут откачки) стационарное давление будем считать предельным для данного насоса $p_{\min} = p_2(t \rightarrow \infty)$. Записать это значение в тетради.

Параллельно с этим, давление $p_1(t)$ в изолированной от насоса части установки с рабочим сосудом будет медленно возрастать из-за натекания воздуха через вакуумные уплотнения. Когда p_1 увеличится приблизительно в 2-3 раза, выключить регистрацию данных, нажав на экране кнопку , и затем выключить насос. На этом измерения закончились. Полный цикл измерений показан на рис.16.

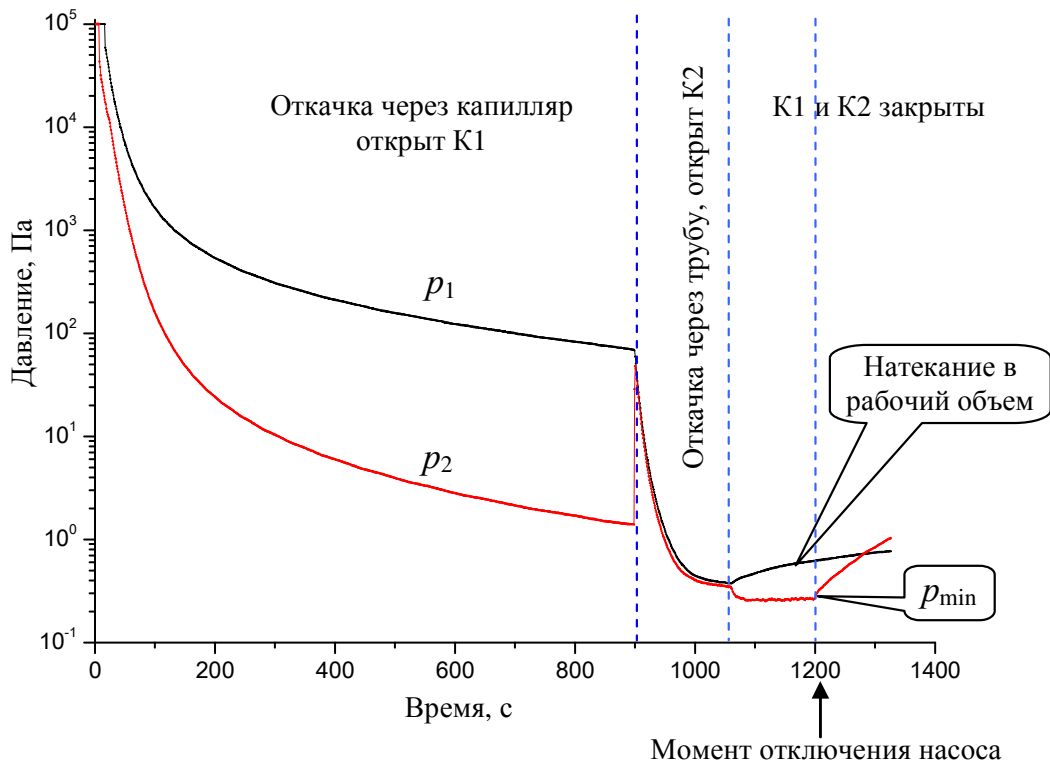



Рис.16 Зависимости давления от времени. Полный цикл измерений

Сохранение результатов. Ввиду большого объема экспериментальных данных целесообразно сохранить результаты на USB флеш-накопителе (или в флеш-памяти мобильного телефона). Для этого подключить его в гнездо шины USB на компьютере, нажать на экране кнопку  или в меню File→Save as и затем выбрать Ваше устройство для сохранения.

Сохраняемый текстовый файл содержит колонку из 4 десятичных цифр, разделенных **запятой**: $t_i, p_1(t_i), t_i, p_2(t_i)$, где t_i – время в секундах, $p(t_i)$ – давление в паскалях. Поскольку контроллер вакуумметра одноканальный, измерения $p_1(t)$ и $p_2(t)$ идут поочередно, и $p_2(t)$ отстает по времени от $p_1(t)$ приблизительно на 0.3 с. При дальнейшей обработке экспериментальных данных этим сдвигом можно пренебречь.

Если нет возможности записать результаты на внешний накопитель, можно выдать их на экран монитора и списать в тетрадь. В этом случае для уменьшения объема данных целесообразно записывать их через каждые 10 секунд измерения (около 60-70 точек).

Обработка результатов

Ввиду большого объема данных всю обработку результатов целесообразно провести в специализированных программах обработки и построения графиков, например (в порядке приоритета): *Origin, Mathematica, MatLab, Mathcad, Grapher, Qtplot, SciDaVis* или, на худой конец, *Excel* или ее аналог *Calc* в бесплатных офисных пакетах *OpenOffice* и *LibreOffice*. Бесплатные программы *Qtplot* и *SciDaVis*, а также пакет *OpenOffice* установлены на рабочем компьютере, а бесплатные дистрибутивы *Qtplot* и *SciDaVis* можно оттуда списать для обработки результатов дома. При вводе результатов в данные программы нужно выбрать импорт данных из текстового ASCII файла с **запятыми** в качестве разделителей цифровых полей. Впрочем, обработать результаты и построить графики можно и вручную по сокращенному набору данных.

Упражнение 1. Первая часть экспериментальных данных до момента открытия клапана K_2 :

1) Построить графики измеренных зависимостей $p_1(t)$ и $p_2(t)$. Из-за большого диапазона изменения давлений все оси давлений **на всех графиках** представить в логарифмическом масштабе. Для удобства считывания значений по графику использовать десятичный, а не натуральный, логарифм.

Необходимые для всех расчетов параметры установки приведены в конце описания.

2) Рассчитать и построить (в логарифмическом масштабе) график потока $I(t)$ через капилляр, рассчитанный по формуле (26). Для численного дифференцирования экспериментального графика $p_1(t)$ можно использовать имеющиеся в указанных выше программах готовые процедуры дифференцирования, либо вычислить производные по формуле

$$\frac{dp}{dt}(t_i) = \frac{p(t_{i+1}) - p(t_{i-1}))}{t_{i+1} - t_{i-1}}.$$

3) Используя $I(t)$, рассчитать по (22) коэффициент динамической вязкости η и **построить** его зависимость от p_1 . Масштаб по оси p_1 также сделать логарифмическим.

4) Найти среднюю скорость молекул воздуха по формуле (24). Рассчитать по формуле (25) длину свободного пробега λ для значений p_1 (на входе в капилляр) и p_2 (на выходе из капилляра) и **построить графики** зависимости длины свободного пробега от давления $\lambda(p_1)$ и $\lambda(p_2)$, используя для обеих осей логарифмический масштаб. Нанести на эти же графики теоретические значения λ для комнатной температуры (298 К), рассчитанные по формуле $\lambda_{\text{теор}} = \frac{6.2}{p} \cdot 10^{-3}$ (м), где давление p задано в паскалях.

5) Рассчитать скорость откачки S насоса в соответствии с (4) $S = I(p_2) / p_2$ и **построить график** $S(p_2)$ (давление в логарифмическом масштабе). Нанести на этот же график теоретическую зависимость $S(p_2)$, рассчитанную согласно (10) по найденному в упражнении 2 предельному давлению насоса p_{min} . Необходимую для расчета величину nV_0 найти из условия, что для среднего вакуума, где $p_2 \gg p_{\text{min}}$ (в нашем случае это $p_2 \approx 500-1000$ Па), выполняется $nV_0 \cong S(p_{\text{ex}})$. Сравнить величину nV_0 с известным параметром производительности насоса, приблизительно равным $5,8$ м³/ч. Учитывая, что скорость вращения насоса около 1500 об/мин, оценить его рабочий и "вредный" объем.

Упражнение 2. Вторая часть экспериментальных данных, начиная с момента закрытия всех клапанов:

б) Построить график давления в сосуде при натекании воздуха $p_1(t)$. Поскольку предполагаемая зависимость линейна, использовать линейный масштаб по оси давлений. С помощью МНК аппроксимировать экспериментальные точки линейной функцией, найти ее коэффициент наклона A и рассчитать поток натекания по аналогии с (26)

$$I_{\text{нат}}(t) = \frac{dQ}{dt} = V \frac{dp_1(t)}{dt} = VA$$

и, по аналогии с (5), оценить скорость натекания $S_{\text{нат}} = \frac{I_{\text{нат}}}{p_1}$. Сравнить скорость натекания и скорость откачки насоса при тех же давлениях.

Параметры установки

Объем рабочего сосуда с учетом соединительных патрубков $V = 6.95$ л.

Капилляр: длина 20 см, радиус 1,8 мм.

Итоги работы

Сравнить с теоретическими данными основные полученные результаты. Объяснить возможные причины расхождений.

Контрольные вопросы

Что такое длина свободного пробега?

Что такое сечение рассеяния? Как вычисляется сечения рассеяния с учетом и без учета взаимного движения молекул?

Вывести формулу (1) для длины свободного пробега.

Каким распределением описывается разброс по скоростям теплового движения молекулы?

Выведите выражение для средней скорости теплового движения молекулы.

Что такое динамическая вязкость? Что такое параметр вязкости и как он зависит от температуры и давления? До каких давлений этот параметр имеет смысл? Как связана вязкость с длиной свободного пробега?

Какое состояние газа называется вакуумом? Как различают степени вакуума? Число Кнудсена.

Какие виды вакуумных насосов вы знаете? Описать цикл работы пластинчато-статорного насоса и его возможности.

Вывести формулы для скорости откачки пластинчато-статорного насоса и величины его предельного вакуума.

Физические принципы работы датчика давления Пирани. Его возможности.

Почему в данной установке в процессе откачки давление, измеряемое датчиком наверху вакуумной камеры, практически равно давлению на верхнем конце капилляра, хотя они разделены большим расстоянием?

Вязкостное и молекулярное течение газа по трубе. Ламинарное течение вязкой среды, когда оно возможно?

Вывести аналог формулы Пуазейля для газа, исходя из ее классического вида для несжимаемой среды (жидкости).

Вывести формулу (25) для вычисления длины свободного пробега по результатам упражнения 1.

Литература

1. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. 4-е издание. М.: Бином, 2010. §52, 54.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. В 5 томах. Том 2. Термодинамика и молекулярная физика М.: Физматлит, 2006. §86, 87, 89, 95, 96.