

Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

**Е. Б. ШЕРШНЕВ, С. А. ЛУКАШЕВИЧ, А. Н. КУПО**

## **ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ**

Практическое пособие

к лабораторному практикуму  
по разделу «Молекулярная физика» курса «Общая физика»  
для студентов физических специальностей университета

Гомель  
ГГУ им. Ф. Скорины  
2022

УДК 531.787(076)  
ББК 31.323я73  
Ш507

Рецензенты:

кандидат физико-математических наук В. Е. Гайшун,  
кандидат технических наук Н. А. Ахраменко

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
учреждения образования «Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины»

**Шершнев, Е. Б.**  
Ш507 Измерение давления : практическое пособие /  
Е. Б. Шершнев, С. А. Лукашевич, А. Н. Купо ; Гомельский  
гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины,  
2022. – 39 с.  
ISBN 978-985-577-821-0

Целью практического пособия является измерение давления с по-  
мощью различных приборов, а также изучение зависимости давления от  
температуры.

Адресовано студентам физических специальностей.

УДК 531.787(076)  
ББК 31.323я73

**ISBN 978-985-577-821-0**

© Шершнев Е. Б., Лукашевич С. А.,  
Купо А. Н., 2022

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный университет  
имени Франциска Скорины», 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Исторические предпосылки формирования понятия давления.....	5
1.1. Атмосферное давление.....	5
1.2. Единицы измерения давления.....	6
2. Измерение атмосферного давления.....	8
2.1. Сифонно-чашечный ртутный барометр.....	8
2.2. Барометр-анероид.....	10
2.3. Водяной барометр Паскаля.....	12
2.4. Атмосферное давление на различных высотах.....	13
2.4.1. Барометрическая формула.....	14
3. Методы измерения давления с помощью вакуумной техники.....	20
3.1. Способ получения и измерения высокого вакуума.....	20
3.2. Принцип работы поршневого механического насоса.....	23
3.3. Принцип работы диффузионного насоса.....	26
4. Типы манометров, применяемых для измерения давления вакуумной техникой.....	30
4.1. Компрессионный манометр Мак-Леода.....	30
4.2. Термопарный манометр.....	32
4.3. Ионизационный манометр.....	33
Вопросы для закрепления пройденного материала.....	35
Задания для самостоятельной работы.....	36
1. Задачи на тему «Измерение давления с учетом погрешностей».....	36
2. Задачи на тему «Давление. Сила давления» с техническим содержанием.....	38
Литература.....	39

## ВВЕДЕНИЕ

Тему «Давление жидкостей и газов» учащиеся изучают на первой ступени обучения. При изучении этой темы применяют индивидуальный метод изложения.

Еще с давних времен было замечено, что давление воздуха заставляет вращаться крылья ветряных мельниц, поддерживает летящие самолеты, давление газов гонит ракетные корабли, приводит в движение пневматические молоты и газовые двигатели; ветры давлением воздуха надувают паруса, сносят дома, приносят дожди, которые необходимы людям и другим живым существам.

Поэтому возникает вопрос: «Если воздух производит давление, то как измерить это давление?» В то же время необходимо подумать над тем, как управлять этим давлением газов и как заставить работать на благо человека.

Принимая во внимание все эти вопросы, в пособии рассмотрены исторические сведения по открытию атмосферного давления, определены его единицы измерения. Показано, что за величину нормального давления мы принимаем 101 325 Па, что соответствует высоте поднятия ртути 760 мм в стеклянной трубке. Особое внимание уделено вопросам измерения атмосферного давления с помощью барометров различной конструкции.

Основой вакуумной техники является получение низкого давления. Для этого в пособии предложены методы и принципы работы поршневого механического и диффузионного насосов.

Работая в лаборатории, студентам постоянно приходится иметь дело с измерением давления, а на старших курсах им необходимо изучить типы манометров, применяемых в вакуумной технике.

Особого внимания заслуживают задания на измерение давления с учетом погрешностей.

В пособии подобраны задания для самостоятельной работы и вопросы для закрепления пройденного материала, предлагается специальная литература по изучению физического смысла давления и его измерению с помощью различных приборов.

# 1. ИСТОРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОНЯТИЯ ДАВЛЕНИЯ

## 1.1. Атмосферное давление

Земля окружена слоем воздуха в несколько сот километров. Мы живём на самом дне этого колоссального воздушного океана. Воздух имеет вес. Как вода давит на всякое тело, находящееся в ней, так и воздух давит на все предметы.

Окружающий Землю слой воздуха называется атмосферой (слово «атмосфера» происходит от греческих слов: «атмос» – воздух и «сфера» – шар). Давление воздуха называется атмосферным. В существовании атмосферного давления можно убедиться на опыте.

Нальём воды в узкую длинную стеклянную трубку, закрыв один конец пальцем. Можно осторожно перевернуть трубку укрытым концом вниз, и вода не выльется из трубки; ее поддерживает давление воздуха снизу. Если открыть и верхний конец трубки, то вода выльется, так как в этом случае воздух давит на воду сверху: давление снизу не может уравновесить давления сверху и веса воды, вследствие чего вода выливается.

Если из запаянной с одного конца трубки с краном на открытом конце выкачать воздух, поместить конец трубки в воду и открыть кран, вода фонтаном брызнет внутрь трубки. Внутри трубки вода не встречает давления воздуха и под давлением наружного воздуха переходит в трубку.

Опустим в воду нижний конец широкой стеклянной трубки, внутри которой вставлен плотно прилегающий к стенкам поршень. Если поднимать поршень, то за ним будет подниматься вода.

Если поднимать поршень, между ним и водой при почти нет воздуха. Давление наружного воздуха заставляет воду подниматься за поршнем. Это явление использовано в устройстве водяных насосов, которое было известно еще в глубокой древности. Учёные того времени, не зная о существовании атмосферного давления, объясняли движение воды в насосе за поршнем тем, что «вода боится пустоты». Пока строили насосы небольшой высоты, неправильное объяснение причины поднятия воды никого не смущало.

В 1640 г. во Флоренции – старинном итальянском городе – строили насос для выкачивания воды из глубокого колодца. Когда насос был готов, то вода поднималась за поршнем на высоту около 10 м. Как ни улучшали мастера конструкцию насоса, вода выше не поднималась, насос

не откачивал воду. Необходимо было выяснить причину этого явления, и мастера обратились за помощью к учёным.

Ученик итальянского учёного Галилея Торричелли, исследуя это явление, высказал предположение, что причиной поднятия воды за поршнем насоса является не «боязнь природной пустоты», а атмосферное давление, которое имеет определённую величину. И если вода под действием атмосферного давления поднимается в насосе только до 10 м, то масло, которое легче воды, поднялось бы выше, а ртуть, плотность которой  $13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , поднялась бы не на 10 м, а на высоту, в 13,6 раза меньшую.

Это предположение Торричелли в 1642 г. было доказано на опыте. Для этого следует взять стеклянную трубку длиной около 1 м, запаянную на одном конце. Трубку наполнить ртутью и, закрыв пальцем открытый конец, опустить его в чашку с ртутью. При отнятии пальца от открытого конца ртуть опустится, но вся не выльется. Высота столба ртути, оставшейся в трубке, окажется около 76 см.

Как давление воздуха заставляет подниматься за поршнем воду в насосе, точно так же давление наружного воздуха поддерживает столб ртути в трубке, так как над ртутью в трубке нет воздуха.

Когда позднее учёным Герике была построена высокая запаянная сверху стеклянная труба, наполненная водой, то столб воды, удерживаемый в этой трубе атмосферным давлением, имел высоту 10,34 м.

Так впервые было доказано существование атмосферного давления и измерена его величина.

Давление, оказываемое столбом ртути высотой 76 см, равно:

$$13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3} * 76 \cdot 10^{-2} \text{м} = 10\,336 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Так как атмосферное давление уравнивает давление ртутного столба высотой около 76 см, то и оно равно  $10\,336 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ .

## 1.2. Единицы измерения давления

За единицу давления в СИ принято давление, которое производит сила 1 Н на перпендикулярную к ней поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$ . Эта единица называется Паскалем (Па):

$$1 \text{ Па} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2}.$$

Наименование единицы давления дано в честь французского учёного Блеза Паскаля (1623–1662).

На практике применяются внесистемные единицы давления: физическая нормальная атмосфера (атм) и миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.):

$$1 \text{ атм} = 101\,325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$$

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

## 2. ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

### 2.1. Сифонно-чашечный ртутный барометр

Действие ртутного барометра основано на уравнивании атмосферным давлением давление ртутного столба, заключенного в барометрической трубке. Сифонно-чашечный ртутный барометр (рисунок 1) состоит из двух стеклянных трубок, опущенных в чашку с ртутью.

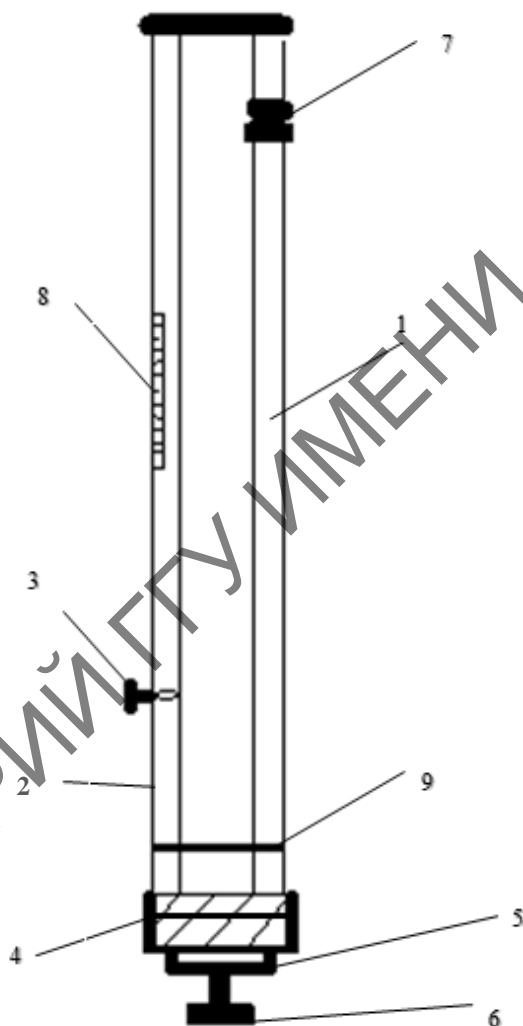


Рисунок 1 – Сифонно-чашечный ртутный барометр

Правая трубка (1) с запаянным верхом (барометрическая трубка) заполнена очищенной ртутью. Левая трубка (2) имеет кран (3), служащий для сообщения барометра с окружающим атмосферным воздухом. Внутри чашки (4) укреплена диафрагма, предохраняющая барометрическую



трубку от возможного попадания воздуха. Дном трубки служит замшевый мешочек (5), заполненный ртутью. Он поддерживается винтом (6), предназначенным для изменения уровня ртути в трубках. Металлическая оправа с прорезями, в которую заключены трубки (1, 2), имеет шкалу для отсчета уровня ртути. Шкала проградуирована в миллибарах (от 0 до 1 070 мб) и снабжена нониусом, нанесенным на подвижной муфте (7). В оправе левой трубки укреплен термометр (8).

Работу с барометром следует начинать с измерения температуры (с точностью до 0,1 °С). Затем, вращением винта (6) добиваются того, чтобы ртуть в трубке (2) была на уровне нуля шкалы, т. е. совпадала с нижним срезом хомута (9). Совмещают нижний срез нониуса с вершиной мениска ртути. Производят отсчет  $H$  по шкале и нониусу. Винтом опускают ртуть ниже прорези. В показания  $H$  барометра необходимо ввести поправку:

- а) постоянную, указанную в проверочном свидетельстве и состоящую из поправки на капиллярность и некоторых других ошибок барометра;
- б) на приведение к нормальной силе тяжести;
- в) температурную.

Следует отметить, что для данного барометра и места его расположения первые две поправки постоянны. Поправки на приведение к нормальной силе тяжести состоят из двух поправок, зависящих от географической широты  $\varphi(\Delta H_\varphi)$  и высоты над уровнем моря  $h(\Delta H_h)$  места установки барометра. Они вычисляются по формулам:

$$\Delta H_\varphi = -H * 0,0026 * \cos 2\varphi ,$$

$$\Delta H_h = -Hh * 0,000000196 ,$$

где  $H$  – давление, измеренное на широте  $\varphi$ ,  $h$  – высота над уровнем моря.

Плотность ртути и длина барометрической шкалы меняются с температурой. Поэтому показания барометра приводят к 0 °С. Так как шкала градуировалась при 0 °С, то число делений, соответствующих данному делению, в действительности равно  $H(1 + \alpha t)$ , где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала шкалы (латунь). Если  $H_0$  – высота столбика ртути при 0 °С, а  $\rho_0$  и  $\rho_t$  – плотности ртути при 0 и 1 °С, то

$$\frac{H_0}{H_t} = \frac{\rho_t}{\rho_0} .$$

Но

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t},$$

где  $\beta$  – коэффициент объемного расширения ртути. Отсюда имеем:

$$H_0 = H \frac{1 + \alpha t}{1 + \beta t}.$$

После преобразований, пренебрегая малыми величинами  $\beta^2$  и  $\alpha\beta$ , получим:

$$H_0 = H [1 - (\beta - \alpha)t].$$

Подставив значение  $\alpha$  для латуни и  $\beta$  для ртути, получим:

$$H_0 = H(1 - 0,000163t),$$

т. е.

$$\Delta H_t = -0,00163 H.$$

Все поправки алгебраически складываются с измеренным значением  $H$ .

$$1 \text{ миллибар} = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ мм рт. ст.} = 10^{-4} \text{ Н/м}^2.$$

## 2.2. Барометр-анероид

Ртутные барометры дают точные показания, но требуют большой осторожности при обращении с ними: они могут легко разбиться, в трубку может попасть воздух. Гораздо удобнее, в особенности при перевозках, барометры–анероиды («анероид» в переводе на русский язык – «безжидкостный»).

Главной частью металлического барометра является металлическая коробочка с волнистой поверхностью (рисунок 2).

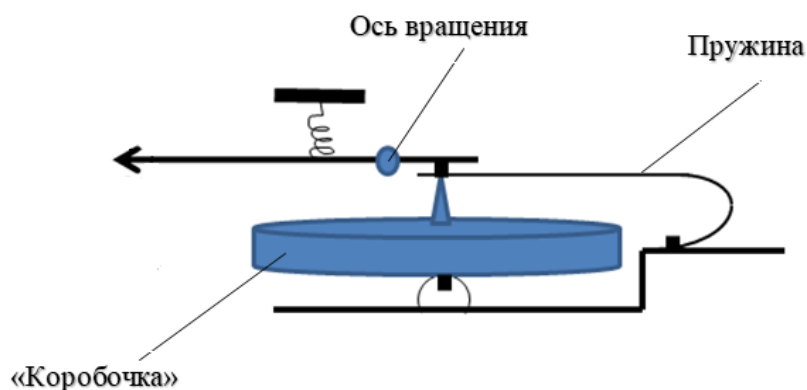


Рисунок 2 – Схема устройства anerоида

Из этой коробочки выкачивается воздух, и, чтобы атмосферное давление не раздавило коробочку, в центре волнистой крышки приделан столбик, который пружиной оттягивается вверх. Таким образом, при увеличении давления крышка коробочки будет прогибаться, при уменьшении давления пружина будет выпрямлять крышку. К столбику посредством перемоточного механизма прикреплена стрелка-указатель, которая передвигается вправо или влево при изменении давления. Под стрелкой укрепляется шкала, деления на которую наносят по показаниям ртутного барометра. Так, например, число 754, против которого стоит стрелка anerоида (рисунок 3), показывает, что в данный момент на ртутном барометре высота ртутного столба 754 мм.



Рисунок 3 – Барометр–анероид

Анероиды очень чувствительны к изменению давления, но, к сожалению, упругость пружины не остаётся постоянной, вследствие чего правильные вначале показания анероида могут с течением времени оказаться неверными. Во избежание возможных ошибок при пользовании анероидом его нужно сверять время от времени с ртутным барометром и, замечая ошибки в показаниях, делать необходимые поправки.

Знание атмосферного давления при предсказании погоды на ближайшие дни весьма важно, так как изменение атмосферного давления связано с изменением погоды. Поэтому барометр является необходимым прибором при метеорологических наблюдениях.

### 2.3. Водяной барометр Паскаля

Паскаль испытывает метод Торричелли измерения атмосферного давления (рисунок 4).

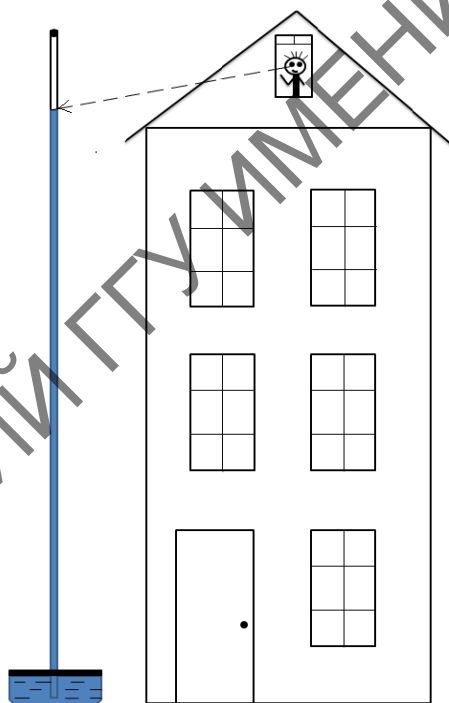


Рисунок 4 – Водяной барометр Паскаля

Когда Блез Паскаль, бывший учеником Галилея, услышал об опыте Торричелли, он сначала скептически отнесся к его результатам. Но в отличие от последователей Аристотеля, которые прибегали к перебранке и спорам, Паскаль составил план решающих опытов, предназначенных доказать или опровергнуть выводы Торричелли.

В 1647 г. в Руане, во Франции, он произвел публичные демонстрации опыта с трубками Торричелли. Его оппоненты, известные под именем «пленисты» (от латинского «plenus» – полный), возражали ему, говоря, что кажущаяся пустота в верхней части трубки была наполнена разреженным воздухом. Паскаль опровергал их, демонстрируя трубки различной формы и размера, две из которых были высотой в 46 футов (14,02 м), а также сифон, одно колено которого было длиной 50 футов (15,24 м), другое – 45 футов (13,72 м).

В другой раз Паскаль поднял барометр Торричелли на колокольню Сен-Жак де-ля-Бушери в Руане и обнаружил уменьшение высоты ртутного столба. Впоследствии рядом с колокольней в честь этого события была поставлена статуя Паскаля.

Не удовлетворившись всем этим, Паскаль уговорил своего шурина подняться с барометром на вершину горы Пью-де-Дом и произвести наблюдения за изменением высоты ртутного столба.

На высоте около 2 700 футов (823 м) барометр «упал» приблизительно на 3 дюйма (0,076). На обратном пути вниз наблюдения повторялись, и ртуть снова поднималась по мере уменьшения высоты. На каждые 900 футов (274,32 м) изменения высоты показания барометра изменялось приблизительно на 1 дюйм (0,025 м). Когда экспедиция вернулась к подножию горы, то барометр показывал столько же, сколько показывал и в начале путешествия, и в то же время другой, оставленный внизу. контрольный барометр не изменил показания за это время.

В заключение Паскаль сказал: «Природа не боится пустоты и не старается избежать ее. Все явления, которые связывались с этой боязнью, производятся весом и давлением воздуха, который и является единственной достоверной причиной, незнание этого привело к изобретению боязни пустоты для объяснения явлений. Это не единственный случай, когда слабость человеческая, потерпев неудачу в объяснении причины, искала выход в изобретениях специального названия, бывшего только пустым звуком».

## **2.4. Атмосферное давление на различных высотах**

Так как причиной атмосферного давления является вес воздуха, то можно ожидать, что при поднятии на гору вследствие уменьшения веса вышележащих слоев должно уменьшаться и давление воздуха.

Для проверки этого предположения в 1648 г. Паскаль поручил своим друзьям выполнить опыт Торричелли одновременно на вершине горы и у её подошвы. Опыт подтвердил предположение Паскаля.

Давление на вершине оказалось меньше, чем у подошвы. Следовательно, по мере подъёма над земной поверхностью атмосферное давление уменьшается. Наблюдения показывают, что высота барометра в местностях, лежащих на уровне моря, в среднем 76 см, или 760 мм. Чем выше лежит место над уровнем моря, тем меньшее давление показывает барометр.

Давление атмосферы, уравновешенное столбом ртути при 0° высотой 76 см, или 760 мм, называется нормальным давлением. Значит, нормальное давление атмосферы равно  $10\,336 \frac{H}{M^3}$  или 10 336 Па.

Для удобства расчётов в технике при измерении давлений за единицу давления принимается давление, равное  $1 \frac{кг}{M^2}$ . Такую единицу давления называют технической атмосферой. В таблице 1 приведены барометрические давления на некоторых высотах.

Таблица 1 – Барометрические давления на некоторых высотах

Высота над уровнем моря, м	Показания барометра в мм рт. ст.
0	760
280	749
400	722
600	704
1 000	618
2 000	990
3 000	325
10 000	250

Зная, как понижается давление в зависимости от высоты, можно по показанию барометра определить высоту местности над уровнем моря. Очень чувствительные металлические барометры, имеющие шкалу, по которой непосредственно можно отсчитывать высоту местности, называются альтиметрами (высотомерами) и употребляются в авиации, воздухоплавании и при подъёмах на горы.

### 2.4.1. Барометрическая формула

Изучение атмосферы Земли – важная научная проблема. Ее анализ чрезвычайно усложнён тем, что в атмосфере наблюдаются непрекращающиеся движения масс воздуха. В целях приближённого ознакомления

с некоторыми свойствами реальной атмосферы полезно будет сперва рассмотреть идеализированную систему – изометрическую атмосферу в условиях её механического равновесия.

На рисунке 5 схематически изображены Земля в виде шара с радиусом  $r_0 \approx 6400$  км и единица объёма атмосферы (вблизи экваториальной плоскости) на расстоянии  $r$  и от центра планеты. Давление атмосферы  $p$  представляет собой гидростатическое давление, возникающее благодаря действию земного притяжения (сил тяготения) на газы атмосферы. Оно, как и давление жидкостей, убывает по мере удаления от Земли.

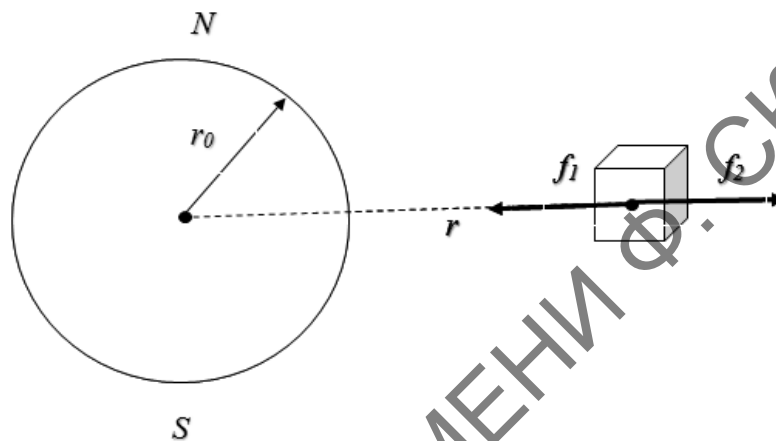


Рисунок 5 – Схема изображения Земли и единица объёма атмосферы на расстоянии  $r$  от центра планеты

Таким образом,  $p = p(r)$  и  $\frac{dp}{dr} < 0$ . На выделенную единицу объёма действует сила  $f_2$  (рисунок 5), обусловленная градиентом  $\frac{dp}{dr}$  и направленная по радиусу от центра Земли. Обратив внимание на то, что  $\frac{dp}{dr}$  есть изменение давления при перемещении на единицу длины вдоль радиуса, легко понять, что  $f_2 = -\frac{dp}{dr}$ . С другой стороны, на выделенный объём действует сила, равная  $f_1 = \rho g$  ( $g$  – ускорение свободного падения).

Для покоящейся атмосферы должно выполняться условие  $f_1 = f_2$ , или

$$\rho g = -\frac{dp}{dr} . \quad (1)$$

Атмосферный воздух достаточно точно описывается уравнением Клапейрона – Менделеева:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT. \quad (1^*)$$

Решив это уравнение относительно  $\rho = m/V$ , найдём плотность:

$$\rho = \mu \frac{p}{RT}. \quad (2)$$

Из (1) и (2), исключив плотность, получим:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\mu}{RT} g dr. \quad (3)$$

Уравнение (3) выражает механическое равновесие, которое может быть реализовано и в том случае, когда температура  $T$  будет некоторой функцией от  $r$ . Полагая, что атмосфера изотермична ( $T = \text{const}$ ) и ( $g = \text{const}$ ) последнее достаточно точно только при небольших изменениях  $r$ , из (3) легко получить интегрированием:

$$p = C e^{-\frac{\mu g}{RT} r}. \quad (4)$$

где  $C$  – постоянная интегрирования (точнее, постоянной интегрирования является  $\ln C$ ).

При начальных условиях  $r = r_0$  и  $p = p_0$  получим:

$$C = p_0 e^{\frac{\mu g}{RT} r_0}.$$

Таким образом,  $p = p_0 e^{-\frac{\mu g}{RT}(r-r_0)}$ . Если осуществить подстановку  $r - r_0 = h$  ( $h$  – высота поднятия над Землёй), то получим:

$$p = p_0 e^{-\frac{\mu g}{RT} h}. \quad (5)$$

При сделанных допущениях формулой (5) описывается зависимость давления от высоты в изотермической атмосфере при небольших поднятиях над Землей ( $h \ll r$ ). Эта формула называется барометрической. Из нее следует, что давление в атмосфере убывает по экспоненциальному закону, и тем быстрее, чем тяжелее газ и чем ниже температура. На рисунке 6 представлены две зависимости вида (5) для двух температур:  $T_1 > T_2$



(Их можно также трактовать как кривые, соответствующие разным газам ( $\mu_1 < \mu_2$ ) при одинаковой температуре).

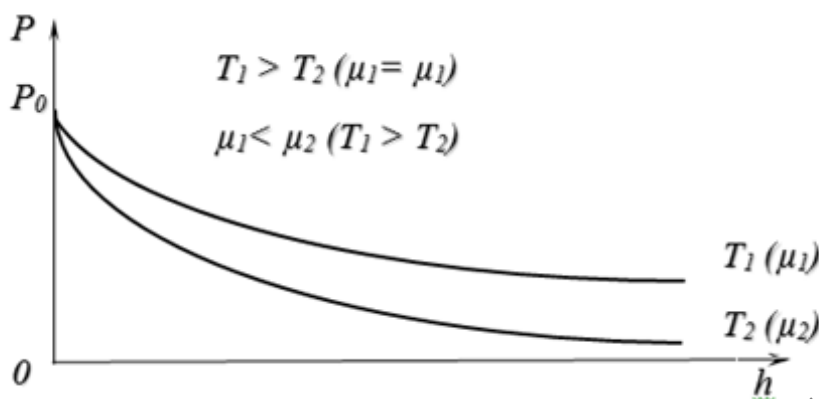


Рисунок 6 – Две зависимости вида формулы (5) для двух температур  $T_1 > T_2$

При получении формулы (5) полагалось, что  $g = \text{const}$ . Получим более точную барометрическую формулу с учетом зависимости  $g = g(r)$ . Для экваториальной плоскости можно записать:

$$g = \gamma_0 \frac{M}{r^2} - \omega^2 r. \quad (6)$$

В последнем соотношении учтено действие тяготения ( $\gamma_0$  – гравитационная постоянная,  $M$  – масса Земли) и действие центробежных сил ( $\omega$  – угловая скорость Земли). Из (3) и (6) имеем:

$$\frac{dp}{p} = \frac{\mu}{RT} \left( \omega^2 r - \gamma_0 \frac{M}{r^2} \right) dr, \quad (7)$$

при условии, что  $T = \text{const}$ , а также  $\omega = \text{const}$  интегрирование (7) приводит к выражению

$$p = p_0 e^{-\frac{\mu}{RT} \left[ \frac{\omega^2}{2} (r_0^2 - r^2) + \gamma_0 M \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right) \right]}. \quad (8)$$

Из (8) для давления атмосферы на бесконечном расстоянии от центра Земли результат получается явно парадоксальным:  $p(r \rightarrow \infty) = \infty$  (функция (8) имеет минимум при  $r \cong 4 * 10^7 i$ ). Это означает, что в гравитационных

полях вращающихся астрономических тел их газообразные атмосферы не могут находиться в равновесии и должны непрерывно рассеиваться в пространство.

Таким образом, в природе существуют системы (атмосферы планет, звезд), к которым понятие термодинамического равновесия заведомо неприменимо, так как для них не выполняется условие механического равновесия, необходимое для всякого термодинамического равновесия.

Обратимся теперь к опытным фактам. На рисунке 7 схематически изображена усредненная зависимость температуры атмосферы от высоты, снятая с помощью шаров-зондов, метеорологических спутников и ракет. Температура при подъеме до 11 км сначала резко падает. Этот слой атмосферы называется тропосферой. Изотермическая область над ней (от 11 до 25 км) с температурой 190–220 К – нижняя стратосфера. Выше, в верхней стратосфере (25–55 км), температура возрастает примерно до 270 К (область инверсии). В мезосфере (55–80 км) температура вновь падает примерно до 180–190 К. За мезосферой лежит термосфера, в ней температура вновь возрастает (до 1 000 К и выше). Состав атмосферы до высот 90 км практически остается неизменным (так называемая гомосфера). В тропосфере падение температуры с высотой в среднем равно 6,5 К на 1 000 м ( $dT/dh = -6,5 \text{ К/км}$ ). Следует отметить, что высота тропосферы зависит от широты. Для умеренных широт она простирается примерно до 11 км, на полюсах несколько ниже, на экваторе выше.

В настоящее время нет удовлетворительной теории, которая количественно описывала бы сложную зависимость температуры атмосферы Земли от высоты (рисунок 7).

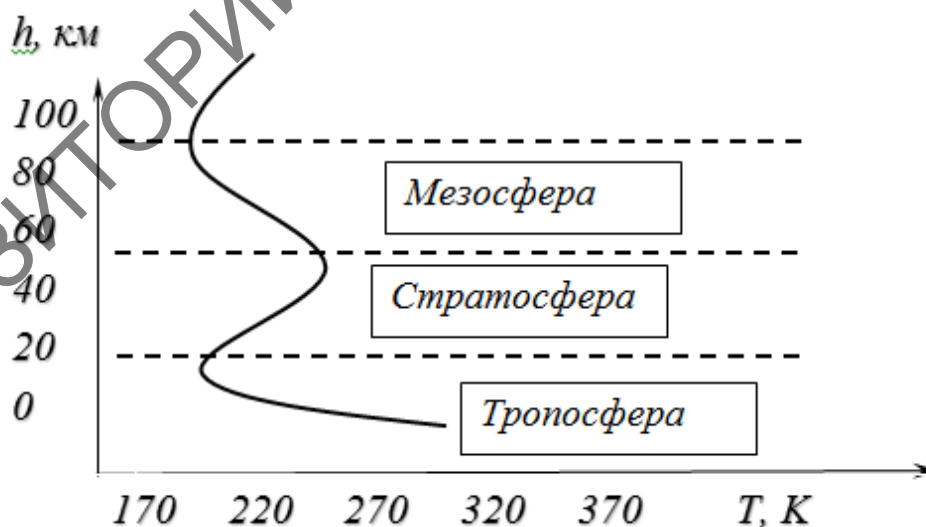


Рисунок 7 – Усреднённая зависимость

Как установлено, общая масса атмосферы составляет приблизительно  $5,15 \cdot 10^{18}$  кг, около 0,9 массы заключено в слое до высоты 16 км и лишь одна миллионная – выше 100 км.

Многими странами для характеристики изменения атмосферного давления с высотой принята так называемая международная стандартная атмосфера. Стандартная атмосфера – условное распределение давлений с высотой, получаемое из (3) в предположении, что давление на уровне моря при  $15^\circ\text{C}$  равно  $1 \text{ атм} = 101\,325 \text{ Па}$ , а падение температуры с высотой составляет  $6,5 \text{ К/км}$  до высоты  $h = 11 \text{ км}$ . На высотах от 11 до 22 км давление в стандартной атмосфере рассчитано по формуле (5).

Следует отметить, что формула (5) в начале XX века послужила основой фундаментальных исследований, сыгравших исключительно важную роль в окончательном торжестве молекулярной теории.

Оказалось, что зависимость (5) не реализуется в атмосфере, но легко воспроизводится в условиях лабораторного эксперимента над броуновскими частицами, взвешенными в жидкости. Экспериментальная проверка зависимости (5) была проведена французским учёным Ж. Перреном.

### 3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Вакуумная техника преследует три цели: получение вакуума, его измерение и его сохранение. Вакуумной называется система ограниченного объема, находящаяся при давлении намного меньше, чем атмосферное. Система или объем, в котором создается вакуум для каких-либо целей, называется реципиентом.

Обычно вакуум делят на низкий, средний и высокий. Степень вакуума зависит от давления газа и от размеров реципиента  $d$ . Если длина свободного пробега молекул  $\tau$  удовлетворяет  $\tau \ll d$ , то вакуум называется низким; если  $\tau \approx d$ , то вакуум средний; если  $\tau \gg d$ , то вакуум высокий.

Насосы, применяемые в современной вакуумной технике, имеют самые разнообразные конструкции в зависимости от назначения вакуумной системы и требований процесса откачки.

Любой из насосов характеризуется двумя главными параметрами: скоростью откачки и предельным давлением.

Скоростью откачки называется поток откачиваемого из реципиента газа, деленный на давление газа у входа в насос

$$S = \frac{I}{p_{\text{вх}}}. \quad (9)$$

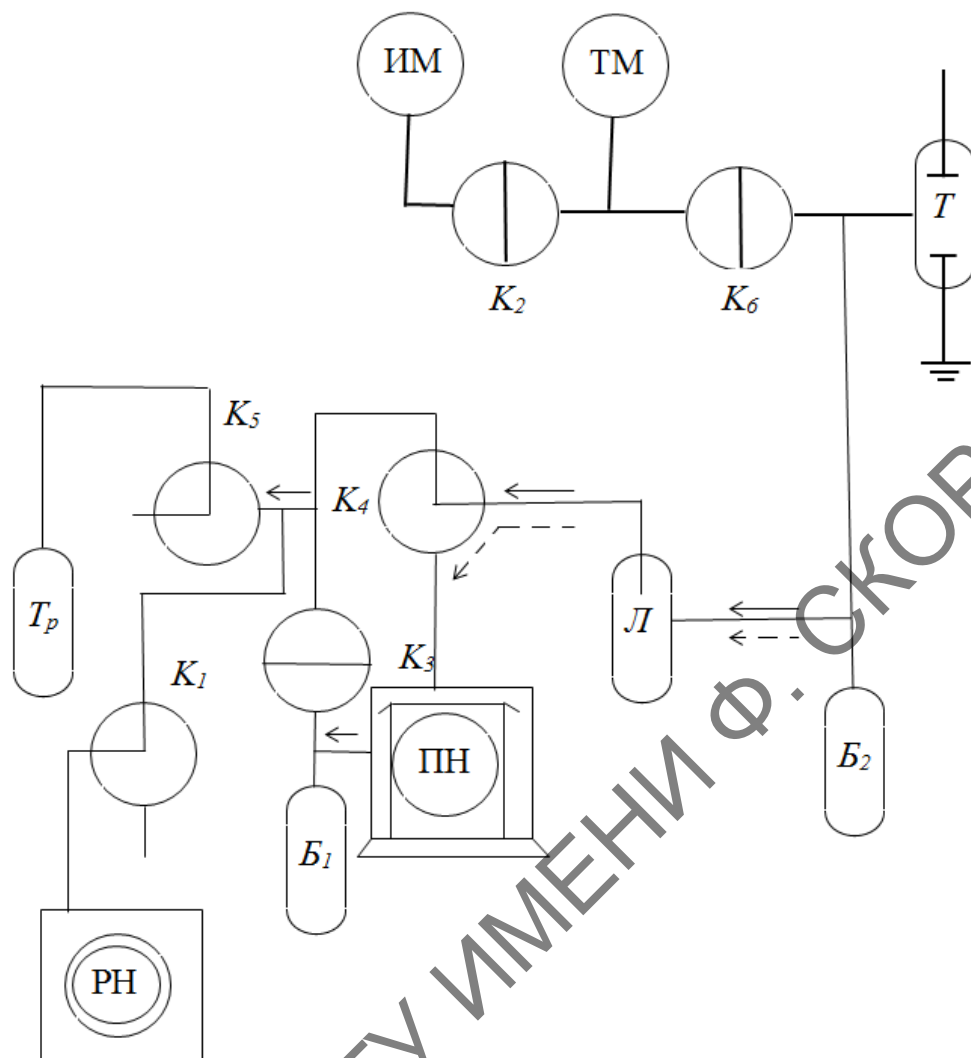
Скорость откачки измеряется в  $\frac{\text{л}}{\text{с}}$ ,  $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ ,  $\frac{\text{см}^3}{\text{с}}$ . Скорость откачки является не только функцией конструктивных особенностей насоса, но и давления  $p_{\text{вх}}$ .

Начиная с некоторого давления, скорость откачки, у любого насоса начинает уменьшаться. Наименьшее давление  $p_{\text{пр}}$ , до которого может быть откачен реципиент, называется предельным давлением насоса. При этом давлении скорость откачки обращается в нуль. Предельное давление является вторым основным параметром насоса.

#### 3.1. Способ получения и измерения высокого вакуума

Описание установки: вакуумная установка содержит все элементы обычных вакуумных устройств, кроме того, она дополнена некоторыми деталями, позволяющими выполнить упражнения.

Схема вакуумной установки приведена на рисунке 8.



- РН – форвакуумный ротационный механический насос;  
 ПН – диффузионный высоковакуумный паромасляный насос;  
 ИМ – ионизационный манометр,  
 ТМ – термодатный манометр;  
 Б<sub>1</sub> – дополнительный форвакуумный баллон;  
 Б<sub>2</sub> – откачиваемый баллон,  
 Л – ловушка для паров масла;  
 Т – разрядная трубка для оценки вакуума по виду свечения газового разряда;  
 Т<sub>р</sub> – трубка «с течью»

Рисунок 8 – Схема вакуумной установки

Форвакуумный насос РН – служит для создания предварительного разрежения, необходимого для работы диффузионного насоса ПН. Краны К<sub>1</sub>–К<sub>6</sub> служат для соединения отдельных частей установки друг с другом. Кран К<sub>1</sub> может соединять форвакуумный насос либо с установкой, либо с атмосферой. В процессе откачки он повернут так, что подключает

к насосу установку. При выключении форвакуумного насоса кран  $K_1$  необходимо соединить с атмосферой, иначе атмосферное давление выдавит масло из рабочей камеры насоса в трубу, соединяющую насос с установкой.

Откачку воздуха форвакуумным насосом из баллона  $B_2$  можно вести как через диффузионный насос, так и минуя этот насос. Для этого служат краны  $K_3$  и  $K_4$ . Если откачка ведется помимо диффузионного насоса, отверстие в пробке трехходового крана  $K_4$  должно быть повернуто в сторону форвакуумного насоса (первый путь) и откачка из баллона  $B_2$  идет в направлении сплошных стрелок. Кран  $K_3$  при этом должен быть закрыт, таким образом, диффузионный насос полностью отключен от установки.

При переключении крана  $K_4$  в сторону диффузионного насоса откачка идет по направлению, указанному пунктирными стрелками, через диффузионный насос (второй путь). При этом кран  $K_3$  должен быть открыт. В начале откачки, если в баллоне большое давление (выше, чем предельное давление форвакуумного насоса), надо создать предварительно необходимое для работы диффузионного насоса разрежение и вести откачку по первому пути и лишь после включения диффузионного насоса переходить на откачку по второму пути. Вообще, часть установки, связанная с диффузионным насосом (насос ПН и баллон  $B_1$ ), всегда должна находиться «под вакуумом», чтобы избежать поглощения воздуха маслом, находящимся в диффузионном насосе.

При выполнении упражнений, во время которых давление меняется от атмосферного до форвакуумного, эта часть установки отключена от всех остальных, что соответствует закрытому крану  $K_3$  и первому положению крана  $K_4$ . Особенно важно, чтобы в разогретый диффузионный насос не попал газ при высоком давлении, так как масло, имеющееся в насосе, при этом сгорает и насос выходит из строя.

Порядок включения установки:

1. После достижения предельного давления, создаваемого форвакуумным насосом, можно приступить к пуску диффузионного насоса (рисунок 8). Для этого переключаем краны  $K_3$  и  $K_4$  так, чтобы откачка из баллона  $B_2$  шла через диффузионный насос. Затем следует пустить воду из водопроводного крана в систему охлаждения диффузионного насоса. Убедившись по стоку воды в достаточности её поступления, включают нагреватель диффузионного насоса. При этом должна загореться сигнальная лампа, укрепленная возле насоса. Нужно постоянно контролировать систему охлаждения. При прекращении подачи воды надо немедленно выключить нагреватель и поставить в известность преподавателя или лаборанта.

Начальный рост давления обусловлен тем, что при разогреве насоса из масла начинает выделяться поглощенный газ. Это длится 10–15 минут.

2. Убедившись при помощи термоэлектрического манометра, что давление в реципиенте не превышает  $10^{-3}$  мм рт. ст., включают вакуумметр ВИ–3 согласно прилагаемой к прибору инструкции и измеряют давление в системе.

3. После измерения давления выключают вакуумметр, закрывают кран  $K_6$  и наблюдают свечение разряда в трубке Т. Недопустимо наблюдать свечение при включенном ионизационном манометре и открытом кране  $K_6$ . Это может привести к порче манометрической лампы. Через 20 мин после первого измерения давления измеряют давление еще раз.

4. После достижения предельного вакуума выключают манометры и нагреватель диффузионного насоса. Следует закрыть все краны (отверстия пробок кранов должны быть обращены к работающему). Поступление воды не прекращается до полного охлаждения насоса. Преждевременное выключение охлаждения приводит к порче масла в насосе.

Выключают форвакуумный насос, краном  $K_1$  сообщают вход форвакуумного насоса с атмосферой. Убедившись, что диффузионный насос остыл, можно выключить подачу воды, охлаждавшей насос.

### 3.2. Принцип работы поршневого механического насоса

Схема поршневого насоса и диаграмма цикла его работы представлены соответственно на рисунках 9, 10.

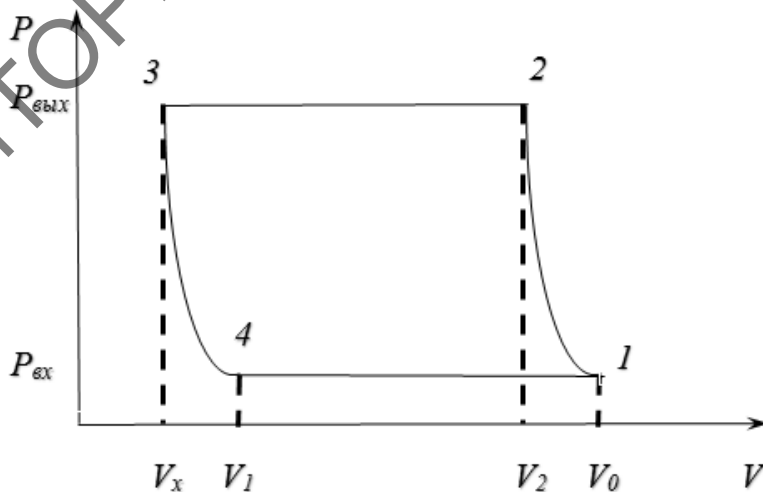
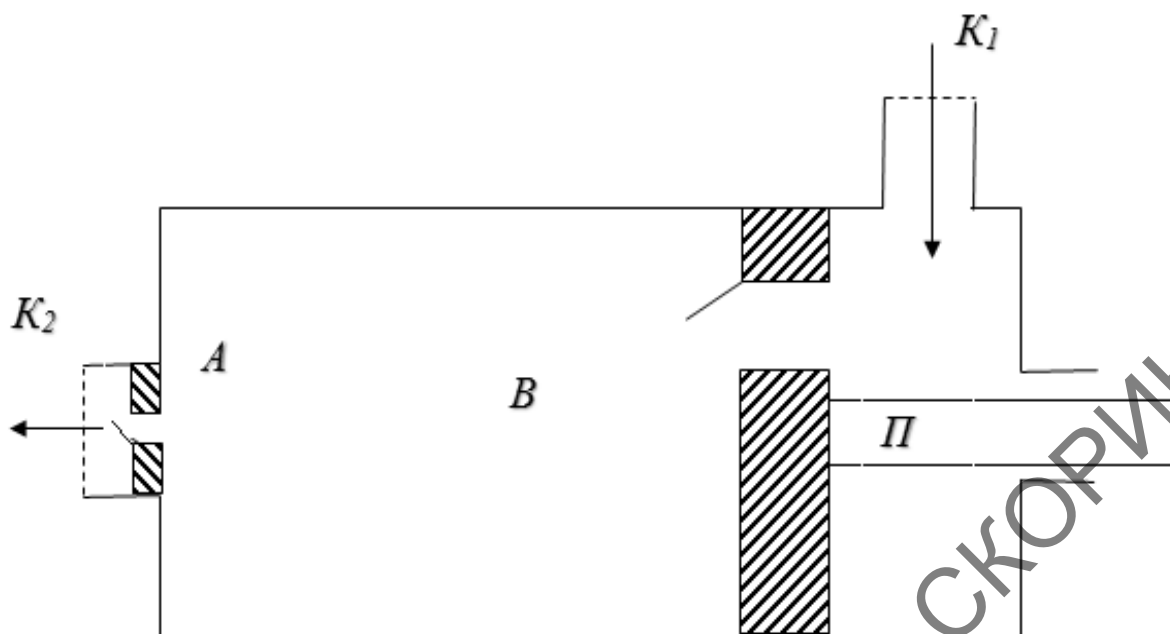


Рисунок 9 – Диаграмма цикла поршневого насоса



П – поршень; В – рабочая камера;  
 $K_1$  – входной клапан;  $K_2$  – выходной клапан

Рисунок 10 – Схема поршневого насоса

Вход насоса соединяется с реципиентом. Пусть объем рабочей камеры насоса равен  $V_0$ . При всасывающем ходе поршня (поршень движется вправо) газ из реципиента через входной клапан  $K_1$ , постепенно заполняет камеру, пока не заполнит ее всю (точка 1 на рисунке 9). Клапан  $K_2$  при этом закрыт. Этот процесс происходит при постоянном входном давлении  $p_{\text{вх}}$ .

Затем поршень адиабатически сжимает газ в камере от давления  $p_{\text{вх}}$  до давления  $p_{\text{вых}}$  (адиабата 1, 2). Входной клапан при этом закрывается, а выходной открывается. Далее газ выталкивается из камеры (изобара 2, 3). Давление в камере при этом остается постоянным и равным  $p_{\text{вых}}$ . Из-за наличия некоторой полости около клапана в камере всегда остается некоторое количество объема  $V_x$ . Большую часть этого объема составляет объем канала А (рисунок 10), соединяющего камеру с клапаном  $A_2$ . Этот объем называется остаточным. При последующем всасывании впускной клапан открывается не сразу, а только после того, как давление в рабочей камере упадет до  $p_{\text{вх}}$  (адиабата 3, 4). Таким образом, открывание входного клапана произойдет только тогда, когда часть рабочей камеры (а именно объем  $V_1$ ) уже заполнена газом при давлении  $p_{\text{вх}}$ . В результате за каждый цикл работы насоса из реципиента откачивается количество газа, равное



$$Q = (V_0 - V_1)P_{\text{вх}}. \quad (10)$$

Если за 1 с насос делает  $n$  циклов, то поток откачиваемого газа

$$I = (V_0 - V_1)P_{\text{вх}} n. \quad (11)$$

Отсюда получим скорость откачки

$$S = n(V_0 - V_1). \quad (12)$$

Выражая  $V_1$  из уравнения адиабаты, получим

$$S = S_0 \left[ 1 - \left( \frac{p_{\text{вх}}}{p_{\text{вх}}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{V_x}{V_0} \right]. \quad (13)$$

Здесь  $S_0 = V_0 n$ . Чем меньше  $p_{\text{вх}}$ , тем меньше скорость откачки. Давление  $p_{\text{вх}}$ , при котором  $S$  обращается в нуль, называется предельным. Ниже этого давления реципиент данным насосом откачать нельзя. Для поршневого насоса предельное давление

$$p_{\text{пр}} = \left( \frac{V_x}{V_0} \right)^{\gamma} p_{\text{вых}}. \quad (14)$$

Чем меньше выходное давление  $p_{\text{вых}}$ , тем лучше предельный вакуум насоса.

Механические насосы обычно работают при  $p_{\text{вых}} = 1$  атм. Для улучшения предельного вакуума в таких насосах применяют две ступени откачки. Каждая ступень откачки состоит из отдельной камеры, работающей как самостоятельный насос. Выход первой камеры соединен с входом второй. Таким образом, выходное давление первой камеры  $p_{\text{вых1}}$  равно входному давлению второй камеры  $p_{\text{вых2}}$ . Если параметры  $V_0$  и  $V_x$  для обеих камер равны, то предельный вакуум двухступенчатого насоса равен

$$p_{\text{пр}} = \left( \frac{V_x}{V_0} \right)^{2\gamma} p_{\text{вых}}. \quad (15)$$

В конструкциях реальных насосов обычно применяются вращающиеся в цилиндрической камере поршни. Общее рассмотрение работы насоса с поршнем, приведенное выше, остается справедливым и для таких насосов.

### 3.3. Принцип работы диффузионного насоса

Механические насосы обычно не создают в реципиенте достаточно высокого вакуума. Их предельное давление не ниже, чем  $10^{-3}$  мм рт. ст. Поэтому механические насосы, как правило, используют совместно с диффузионными.

Схема пароструйного диффузионного насоса представлена на рисунке 11.

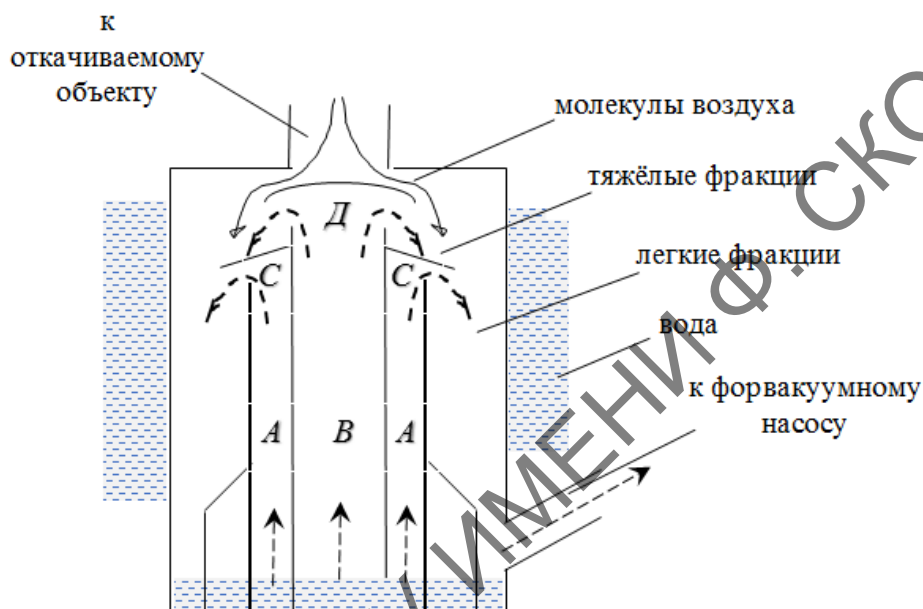


Рисунок 11 – Многоступенчатый диффузионный насос

Одноступенчатый диффузионный насос состоит из паропровода (П), сопла (С) и диффузора (Д). Струя пара выходит из сопла с большой скоростью  $v$ , попадает в диффузор и движется вдоль его оси, заполняя всё сечение диффузора. Молекулы газа из реципиента диффундируют в струю пара и отбрасываются к выходу. Далее газ откачивается механическим насосом. Пары масла конденсируются на стенках диффузора, который обычно охлаждается водой, жидкое масло снова стекает в испаритель (на рисунке не показан) по специальному трубопроводу. Для эффективной откачки необходимо, чтобы молекулы свободно проникали вглубь струи пара. Это возможно лишь при малой плотности пара в струе и малом выходном давлении газа (обычно при  $p < 10^{-2}$  мм рт. ст.).

Рассмотрим приближенную теорию работы диффузионного насоса. Предположим, что струя пара равномерно заполняет сечение диффузора вправо от плоскости среза сопла АВ. Через кольцеобразный зазор между

соплом и стенками диффузора молекулы газа из реципиента проникают в струю пара. В сечении АВ возникает скачок концентрации газовых молекул. Слева от плоскости АВ их концентрация равна  $n_0$ , а справа –  $n_1$ . Обозначим через  $\bar{v}$  среднюю арифметическую скорость молекул газа. В результате теплового движения через  $1 \text{ см}^2$  сечения АВ из реципиента в струю за 1 с проходит  $n_0 \bar{v}/6$  молекул газа. В обратном направлении проходит  $n_1 \bar{v}/6$  молекул. Так как  $n_1 < n_0$ , то результирующий поток молекул направлен из реципиента в струю пара. Суммарное число молекул, прошедших за 1 с через  $1 \text{ см}^2$  сечения потока, равно

$$N = \frac{1}{6} \bar{v} (n_0 - n_1). \quad (16)$$

Поток газа и число молекул связаны соотношением

$$I = \frac{1}{6} \bar{v} (n_0 - n_1) kT, \quad (17)$$

где  $T$  – температура газа. Отсюда скорость откачки:

$$S = \frac{I}{n_0 kT}. \quad (18)$$

Выразим поток газа через  $1 \text{ см}^2$  произвольного сечения диффузора. К выходу насоса со скоростью  $v$  отбрасывается струей пара  $n(x)$   $v$  молекул в секунду. Это соответствует потоку газа

$$I_0 = n(x) v kT. \quad (19)$$

В обратном направлении за 1 с продиффундирует поток газа

$$I_2 = -D \frac{dn}{dx} kT, \quad (20)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии молекул газа. Полный поток

$$I = n(x) v kT - D \frac{dn}{dx} kT. \quad (21)$$

Заменив  $I$  через  $S p_{\text{вх}}$  и решив полученное дифференциальное уравнение, имеем

$$S = \frac{\bar{v}}{6} * \frac{1 - \frac{n(L)e^{-\frac{v}{D}L}}{n_0}}{1 + \frac{1}{6} \frac{\bar{v}}{v} \left(1 - e^{-\frac{v}{D}L}\right)}, \quad (22)$$

где  $L$  – длина диффузора (рисунок 12, на котором показано распределение давления при работе диффузионного насоса).

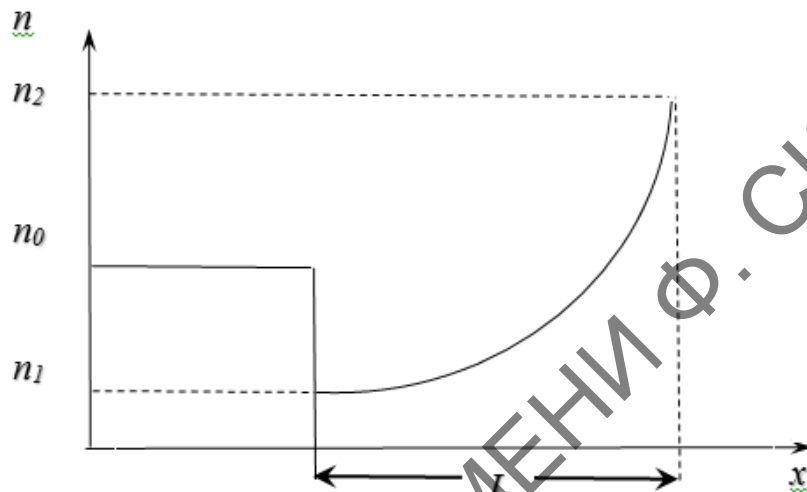


Рисунок 12 – Распределение давления при работе диффузионного насоса

Если учесть, что  $e^{-\frac{v}{D}L}$  – обычно малая величина, то

$$S \approx \frac{\bar{v}}{6} \frac{1}{1 + \frac{1}{6} \frac{\bar{v}}{v}}. \quad (23)$$

Соотношения (22) и (23) дают нам скорость откачки, приходящуюся на 1 см входного сечения насоса. Полная скорость откачки насоса выражается формулой

$$S = \frac{A\bar{v}}{6} \frac{1}{1 + \frac{1}{6} \frac{\bar{v}}{v}}, \quad (24)$$

где  $A$  – площадь сечения зазора между соплом и диффузором.

Скорость паров масла  $v$  в насосе обычно не превышает 180 м/с. С помощью диффузионных насосов достигаются давления до  $10^{-6}$  мм рт. ст.

Более низкое давление не может быть достигнуто из-за проникновения паров масла в реципиент. Для достижения давлений ниже, чем  $10^{-6}$  мм рт. ст. применяют вымораживание паров масла или используют другие типы насосов.

Для улучшения предельного вакуума часто применяют многоступенчатые диффузионные насосы. Каждой ступени соответствует свой паропровод, и своё сопло. На рисунке 13 представлен разрез двухступенчатого диффузионного насоса.

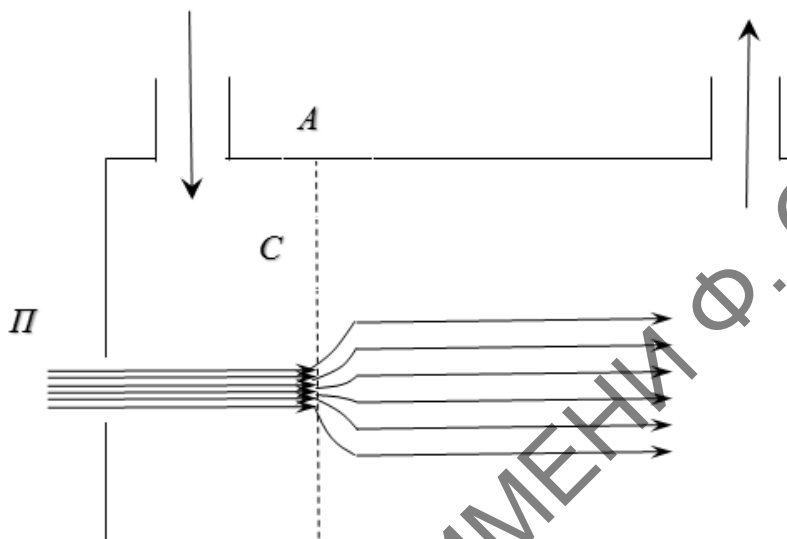


Рисунок 13 – Схема пароструйного диффузионного насоса

Насос имеет два коаксиальных паропровода (А и В), а также два сопла (С и П). Сопла поворачивают струю пара, направляя ее от входа насоса к выходу, вдоль оси диффузора. Если вещество, используемое в испарителе, неоднородное (состоит из нескольких фракций), то применяется фракционная разгонка по компонентам. Наиболее тяжёлые фракции с меньшим давлением насыщающих паров проходят в удаленное от реципиента сопло. Это предотвращает попадание лёгких фракций в реципиент и тем самым снижает предельное давление насоса. Попадание различных фракций в разные паропроводы происходит автоматически благодаря различию в температурах кипения этих фракций. У краёв испарителя улетучиваются лёгкие фракции и попадают в паропровод А. Тяжёлые фракции доходят до центра и только там испаряются, попадая в паропровод В.

## 4. ТИПЫ МАНОМЕТРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКОЙ

### 4.1. Компрессионный манометр Мак-Леода

Действие компрессионного манометра основано на измерении давления газа, сжатого в известное число раз. Если в реципиенте давление газа низкое, то обычным U-образным манометром измерить его трудно. Но если газ предварительно сжать во много раз, то давление сжатого газа уже нетрудно измерить. Манометр Мак-Леода – это U-образный манометр, позволяющий производить предварительное сжатие газа.

В исходном состоянии газ заполняет некоторый известный объем  $V_0$  манометра, сообщающийся с реципиентом, и имеет некоторое давление  $p_x$ , равное давлению в реципиенте (рисунок 14).

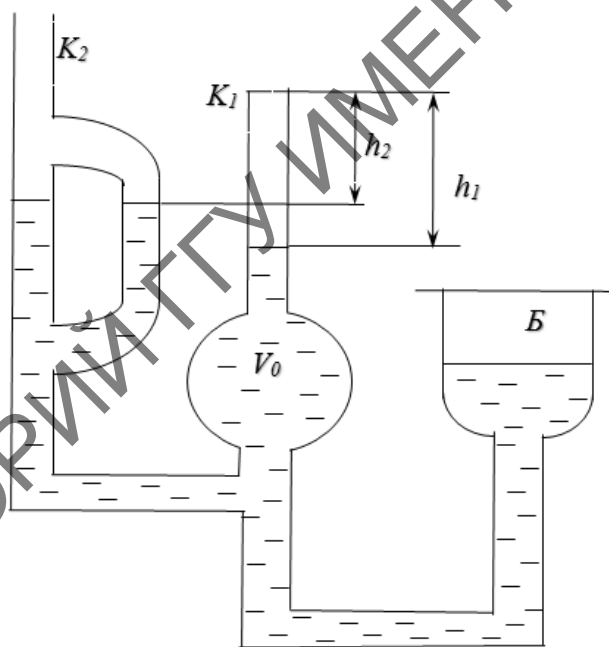


Рисунок 14 – Схема компрессионного манометра Мак-Леода

Подвижный резервуар Б позволяет заполнять объем  $V_0$  жидкостью. Жидкость вытесняет газ в капилляр  $K_1$ , сжимая газ до некоторого давления, которое значительно больше, чем  $p_x$ . Разность уровней жидкости в капиллярах  $K_1$  и  $K_2$  служит мерой давления этого сжатого газа. Уровень жидкости в капилляре  $K_2$  в общем случае выше, чем в капилляре  $K_1$ . Обычно

сжимающей жидкостью служит ртуть. Если до сжатия давления газа в объеме  $V_0$  было  $p_x$ , то после сжатия давление равно разности уровней ртути,  $h_1 - h_2$ , а объем равен  $h_1 S$ , где  $S$  – сечение капилляра  $K_1$ ,  $h_1$  – высота заполненной газом части капилляра.

Применяя закон Бойля – Мариотта, получим искомое давление

$$p_x = \frac{S}{V_0} (h_1 - h_2) h_1 \text{ мм рт. ст.} \quad (25)$$

Обычно уровень ртути в капилляре  $K_2$  доводят до вершины капилляра  $K_1$  ( $h_2 = 0$ ). Тогда

$$p_x = \frac{S}{V_0} h_1^2 \text{ мм рт. ст.} \quad (26)$$

Этот метод называется квадратичным методом измерения. Величина  $\frac{S}{V_0}$  называется постоянной манометра Мак-Леода.

Если доводить уровень ртути в капилляре  $K_1$  до определённой метки  $h_{01}$ , то

$$p_x = \frac{S}{V_0} h_{01} \Delta h \text{ мм рт. ст.} \quad (27)$$

Здесь  $\Delta h$  – разность уровней ртути в капиллярах. Этот метод называется линейным методом измерения.

Если принять, что наименьшее измеримое  $\Delta h = 1$  мм, то минимальное давление (квадратичный метод), измеримое манометром, равно

$$p_{\min} = \frac{S}{V_0} \text{ мм рт. ст.} \quad (28)$$

Максимальное давление, измеримое манометром, равно

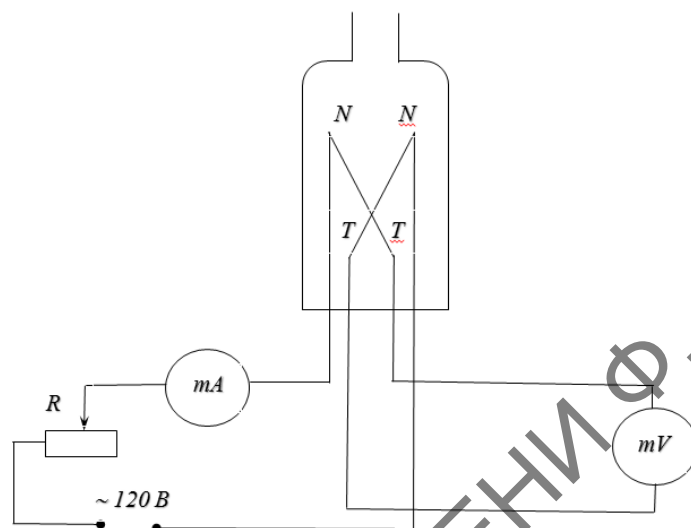
$$p_{\max} = \frac{S}{V_0} H^2 \text{ мм рт. ст. ,} \quad (29)$$

где  $H$  – длина капилляра  $K_1$ .

Манометр Мак-Леода является абсолютным манометром и не требует предварительной градуировки.

## 4.2. Термопарный манометр

Принцип действия манометра основан на зависимости коэффициента теплопроводности газа от давления. Электрическая схема применяемого в данной задаче манометра с термопарной лампой ЛТ-2 приведена на рисунке 15.



НН – нить накала, ТТ – термопара

Рисунок 15 – Электрическая схема термопарного манометра

В манометрической лампе этого типа имеется нить накала (НН), нагреваемая электрическим током. К середине нити накала прикреплен один спай термопары (ТТ), другой спай имеет температуру стенок лампы.

При изменении давления в некотором диапазоне его значений теплопроводность газа начинает зависеть от давления. Температура нити накала также начинает изменяться. Индикатором изменения температуры служит термо-ЭДС. Величину термо-ЭДС измеряют милливольтметром; она является мерой давления газа.

В манометрической лампе процесс теплопередачи идет между металлической нитью и цилиндрическим корпусом лампы, радиус которого значительно больше радиуса нити  $r$  (обычно  $r = 0,01$  см). В этом случае, в отличие от случая теплопередачи между двумя параллельными плоскостями, коэффициент теплопроводности зависит от давления только при условии  $\tau > r$ , где  $\tau$  – длина свободного пробега молекул газа. Это условие ограничивает рабочую область манометра со стороны высоких давлений.



При малых давлениях теплопроводность газа падает, а температура нити растет. При этом потери тепла, обусловленные теплоизлучением и теплопроводностью держателей нити, становятся больше, чем тепловой поток, переносимый газом. Температура нити перестает определяться давлением газа. Эти факторы ограничивают рабочую область манометра со стороны низких давлений. Рабочая область манометрической лампы ЛТ-2 лежит между  $0,5$  и  $10^{-3}$  мм рт. ст. Ток накала обычно подбирается так, чтобы при давлении  $10^{-3}$  мм рт. ст. термо-ЭДС была равна  $10$  мВ. Это значение тока указывается на цоколе лампы.

Недостаток термопарных манометров заключается в том, что они не являются абсолютными и требуют предварительной градуировки. Эта градуировка зависит от рода газа, давление которого измеряется.

### 4.3. Ионизационный манометр

Ионизационный манометр измеряет давления ниже  $10^{-3}$  мм рт. ст. На данной вакуумной установке используется прибор ВИ-3 с манометрической лампой ЛМ-2. Принцип действия манометра основан на зависимости числа ионизации газовых молекул электронами от давления газа. Принципиальная схема прибора представлена на рисунке 16.

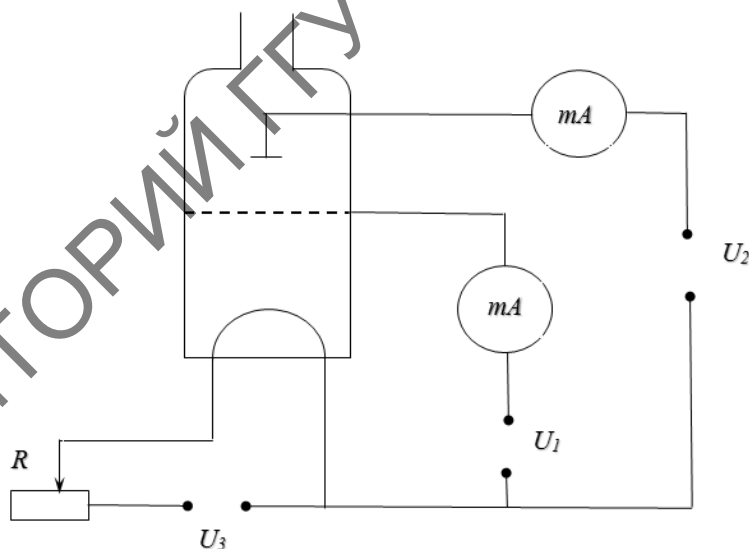


Рисунок 16 – Принципиальная электрическая схема ионизационного манометра

Манометрическая лампа имеет катод (К) и расположенные коаксиально вокруг катода цилиндрические сетку (С) и коллектор (Р). Перед включением прибора сетка манометра прогревается до красного каления

(в данной схеме цепь прогрева не указана) для обезгаживания материала сетки. Затем прогрев выключается. Изменяя накал катода, устанавливают ток эмиссии электронов равным  $I = 5$  мА. Сетка имеет относительно катода положительный потенциал  $U_1 = 200$  В. Электроны, ускоренные в поле между катодом и сеткой, проскакивают сквозь нее в область между сеткой и коллектором. Коллектор имеет относительно катода отрицательный потенциал  $U = 25$  В. Поэтому электроды на коллектор не попадают, а отражаются назад, к катоду, и, таким образом, колеблются между коллектором и катодом. Вследствие колебаний удлиняется траектория электрона, а вероятность столкновения его с молекулами газа растет. Образующиеся при столкновении электрона и молекулы положительные ионы собираются на коллекторе, а потерявшие энергию электроны уходят на сетку.

Чем больше давление, тем чаще происходит ионизация. Ионный ток на коллектор  $I_p$  является мерой давления газа. Он пропорционален давлению

$$I_p = C p. \quad (30)$$

Коэффициент пропорциональности  $C$  для лампы ЛМ-2 равен 0,1 А/мм рт. ст. Одновременно с ионизацией происходит возбуждение молекул с последующим излучением фотонов. Эти фотоны вызывают фотоэмиссию электронов с коллектора. Если давление газа мало (менее  $10^{-7}$  мм рт. ст.), то ионный ток становится малым по сравнению с фототоком. Фотоэффект ограничивает рабочую область манометра со стороны низких давлений. В лампе ЛМ-2 эта граница составляет  $5 \cdot 10^{-8}$  мм рт. ст.

При больших давлениях манометр также не может работать из-за опасности перегораний катода. Катод (обычно вольфрамовый) при давлении в манометре выше  $10^{-3}$  мм рт. ст. в присутствии активных газов – кислорода, паров воды и других – быстро разрушается. Это явление ограничивает возможность применения ионизационного манометра с накаливаемым катодом со стороны высоких давлений.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПРОЙДЕННОГО МАТЕРИАЛА

1. Кусок свинца в 1 г падает быстрее 1 г пуха. Объясните.
2. Докажите, что: а) воздух занимает пространство; б) имеет вес.
3. Какова масса 1 л воздуха при нормальных условиях?
4. Что тяжелее – накачанный или ненакачанный футбольный мяч?

Как проверить это?

5. Что такое манометр и для чего он служит?
6. Предложите три возможные гипотезы, делая логические выводы из каждой, о причине, по которой поднимается вода во всасывающем насосе.
7. Приведите пример трех доступных наблюдению явлений, которые подтверждают существование атмосферного давления.
8. Какое утверждение Аристотеля препятствовало открытию причины, заставляющей воду подниматься в насосе?
9. Объясните опыт Торричелли.
10. Экспедиция Паскаля захватила на гору надутый пузырь. Как изменились в пути его размеры? Что это могло означать?
11. Что, по мнению Торричелли, находилось в его барометрической трубке над ртутью? Что в связи с этим должно происходить при наклоне трубки? Что это доказывает?
12. Почему трудно выпить сырое яйцо, имеющее отверстие с одной стороны? Что нужно сделать, чтобы облегчить себе задачу?
13. Почему Торричелли в своем барометре применил ртуть, а не воду?
14. Объясните, что заставляет чернила наполнять авторучку.

## ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Комната имеет 8 м в длину, 5 м в ширину и 3 м в высоту. Найдите приблизительно вес воздуха в комнате.

2. Если барометр показывает 74 см рт. ст., то чему равно атмосферное давление в Па?

3. Если водяной барометр показывает 10,33 л водяного столба, то чему равно давление в Па?

4. Если давление на грудь мальчика равно 1 атмосфере, то какая сила приходится на 1 см? Почему она не раздавит мальчика?

5. Барометр на самолете показывает 65 см рт. ст. Какова высота самолета над уровнем моря?

6. Самолет находится на высоте 900 м над уровнем моря. Каково приблизительно показание барометра (в см рт. ст.)?

7. Самолет находится на высоте 1 200 м над уровнем моря. Каково приблизительно показание барометра (в мм рт. ст.)?

8. У подножия горы барометр показывает 73,6 см, при поднятии на вершину горы – 67,6 см. Какова приблизительно разность уровней?

9. Будет ли изменяться давление с высотой в той же пропорции (задача 8), если продолжать подниматься вверх? Объясните.

10. Пилот установил при старте альтиметр на нуль. Во время подъема самолета давление у поверхности земли увеличилось на 5 мм рт. ст. Какова будет ошибка показания альтиметра в этом случае?

11. Если атмосферное давление равно  $1\ 000\ \text{г/см}^2$ , то как высока может быть трубка сифона?

12. Если давление равно 1 атмосфере, то как высоко может быть поднят спирт в сифоне? Плотность спирта составляет 0,8 плотности воды.

13. Какое давление (в атмосферах) производит вода на пузырек воздуха на глубине 20 м?

### 1. Задачи на тему «Измерение давления с учетом погрешностей»

1. Двумя пружинными манометрами измерено давление воздуха в последней камере компрессора. Один манометр имеет погрешность 1% от верхнего предела измерений, другой – 4%. Первый показал 600 кПа, второй – 590 кПа. Назовите действительное значение давления в камере, оцените возможное истинное значение давления, а также погрешность измерения вторым манометром.

Ответ: действительное значение  $A_D = 600$  кПа, истинное значение  $A_{ист}$  ориентировочно лежит в пределах  $(600 \pm 6)$  кПа. Абсолютная погрешность измерения этого давления вторым манометром  $\Delta A_{изм} = A_{изм} - A_D$ , отсюда  $\Delta A_{изм} = 590$  кПа – 600 кПа = –10 кПа. Относительная погрешность

$$\delta = \frac{\Delta A_{изм} * 100}{600} \% = \frac{-10 * 100}{600} \% = -1,7 \%$$

2. Приведите зависимость, которой необходимо пользоваться при переградуировке U-образного жидкостного манометра с использованием воды (или ртути) для замены шкалы в миллиметрах водяного (или ртутного) столба на шкалу в паскалях (Па).

Ответ:  $H = \left( \frac{1}{\rho g} \right) P$ ,  $H$  – расстояние от нулевой отметки шкалы до отметки, соответствующей давлению  $P$ , мм;  $P$  – давление, Па;  $\rho$  – плотность воды (ртути),  $\frac{кг}{м^3}$ ,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\frac{м}{с^2}$ .

3. Сравните погрешности измерения давления в 100 кПа пружинными манометрами классов точности 0,2 и 1,0 с пределами измерений на 600 и 100 кПа, соответственно.

Ответ: манометр класса 0,2 на 600 кПа при измерении 100 кПа будет иметь погрешность  $\pm 1,2$  %, а манометр класса 1,0 при измерении последней точки шкалы  $\pm 1,0$  %.

$\pm 1,2 > \pm 1,0$  %. Следовательно, второй прибор оказался в данном случае более точным.

4. Оцените годность пружинного манометра класса 1,0 на 60 кПа, если при его поверке методом сличения с образцовым манометром класса 0,2 в точке 50 кПа при повышении давления было зафиксировано 49,5 кПа, а при понижении – 50,2 кПа.

Ответ: вариация показания пружинного манометра не должна превышать основной погрешности. В нашем случае манометр 1,0 может иметь абсолютную погрешность  $\Delta = \frac{\gamma A_k}{100} = \frac{1 * 60}{100} = 0,6$  кПа. Это же значение может иметь и вариация показаний  $b$ .

$b = |\Delta_b - \Delta_m| = A_b - A_m$ , где  $\Delta_b$  и  $\Delta_m$  – абсолютная погрешность при подходе к поверяемой точке со стороны больших и меньших значений, соответственно;  $A_b$  и  $A_m$  – показания образцового прибора в этих точках, т. е.  $b = |50,2 - 49,5| = 0,7$  кПа.

Следовательно,  $b > \Delta$ , так как  $0,7$  кПа  $>$   $0,6$  кПа. Манометр должен

быть забракован несмотря на то, что погрешности в точке 50 кПа не превышают допускаемую: ( $0,2 < 0,6$  и  $0,5 < 0,6$ ).

## 2. Задачи на тему «Давление. Сила давления» с техническим содержанием

1. На заболоченном участке земли машины не проваливаются, если их давление на почву не превышает 200 кПа. Обеспечивают ли трактору Т-130Б высокую проходимость уширенные гусеницы (0,92 м) при сравнительно большой его массе (13 945 кг)? Длина каждой гусеницы 2,9 м.

2. Для чего при соединении мягких материалов под головку болта подкладывают шайбу большего диаметра?

3. Какое давление на лунный грунт оказывал астронавт, масса которого со снаряжением 175 кг, а ботинок оставлял след площадью 410 см<sup>2</sup>?

4. Допустимое давление для некоторого сорта бетона равно 5 000 кПа. Если давление превышает указанное значение, то бетонные конструкции могут разрушиться. Какую нагрузку может выдержать колонна из бетона, если площадь ее поперечного сечения 1,6 м<sup>2</sup>.

5. Определите наибольшую высоту бетонной колонны, которая может разрушиться под действием собственной силы тяжести, если допустимое давление бетона 5 000 кПа.

6. Останкинская башня в Москве опирается на фундамент десятью «ножками», площадь опоры каждой 4,7 м<sup>2</sup>. Масса башни 32 000 т. Определите давление, производимое башней на фундамент, с учетом, что при сильном ветре давление на основание некоторых «ножек» становится больше на 2,7 МПа.

7. Свойство металла сопротивляться проникновению другого металла называют твердостью. Твердость определяют с помощью стального шарика. Какое давление производит шарик на поверхность стали под действием силы 1 500 Н, если площадь отпечатка, оставляемого этим шариком, равна 0,01 мм<sup>2</sup>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кортнев, А. В. Практикум по физике / А. В. Кортнев, Ю. В. Рублев, А. Н. Куценко. – М. : «Высшая школа», 1963. – 560 с.
2. Яковлев, В. Ф. Курс физики. Теплота и молекулярная физика / В. Ф. Яковлев. – М. : «Просвещение», 1973. – 320 с.
3. Механика и молекулярная физика : физический практикум / сост. : А. Г. Белянкин, Г. П. Мотулевич, Е. С. Четверикова, И. А. Яковлев; под ред. проф. Ивероновой. – М. : «Наука», 1967. – 352 с.
4. Перышкин, А. В. Физика / А. В. Перышкин, Г. И. Фалеев, В. В. Крауклис. – М. : «Учпедгиз», 1956. – 128 с.
5. Элпиот, Л. Физика / Л. Элпиот, У. Уилкоккс. – М. : «Наука», 1975. – 736 с.
6. Низамов, И. М. Задачи по физике с техническим содержанием / И. М. Назамов. – М. : «Просвещение», 1980. – 96 с.
7. Шабалин, С. А. Прикладная метрология в вопросах и ответах / С. А. Шабалин. – М. : «Изд-во стандартов», 1986. – 200 с.

Производственно-практическое издание

**Шершне** Евгений Борисович,  
**Лукашевич** Светлана Анатольевна,  
**Купо** Александр Николаевич

## **ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ**

Практическое пособие

Редактор А. А. Негодина  
Корректор В. В. Калугина

Подписано в печать 21.01.2022. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд. л. 2,54.

Тираж 20 экз. Заказ 35.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования

«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.

Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.

Ул. Советская, 104, 246028, Гомель



РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

**Е. Б. ШЕРШНЕВ, С. А. ЛУКАШЕВИЧ, А. Н. КУПО**

# **ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ**

Гомель  
2022

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ