

Министерство образования Российской Федерации

Российский государственный педагогический
университет имени А. И. Герцена

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ**

Санкт-Петербург
Издательство РГПУ им. А.И. Герцена
2000

Печатается по решению УМО вузов России по педагогическому образованию Министерства образования РФ

**Авторы: В.А.Бордовский, В.Т.Аванесян,
Н.И.Анисимова, В.И.Сельдяев**

Научный редактор: доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физической электроники **С.Д.Ханин**

Рецензенты: доктор технических наук, профессор кафедры машиноведения РГПУ им. А.И.Герцена **В.Г.Бойцов**; кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники РГПУ им. А.И.Герцена **С.А.Потачев**

Содержит описания 5 лабораторных работ по общей физике (молекулярная физика), предназначенных для студентов факультетов технологии и предпринимательства, химии, биологии и института естествознания.

© Коллектив авторов, 2000

© Издательство РГПУ им. А.И.Герцена, 2000

Оглавление

Работа № 10. Определение влажности воздуха.....	4
Работа № 11. Определение отношения теплоемкостей воздуха методом Клемана-Дезорма.....	25
Работа № 12. Определение коэффициента вязкости воздуха.....	37
Работа № 13. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.....	46
Работа № 14. Определение коэффициента поверхно- стного натяжения жидкости методом отрыва кольца.....	56

Работа № 10. **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА**

Цель работы: научиться экспериментально определять разными методами влажность воздуха.

Принадлежности: гигрометр Ламбрехта, термометр, эфир, резиновая груша, аспирационный психрометр Ассмана, волосной гигрометр.

Вопросы, знание которых обязательно для допуска к выполнению работы

1. В каких агрегатных состояниях может существовать вещество?
2. Что такое фазовые переходы и чем они определяются?
3. Какой пар называется насыщенным (ненасыщенным)? Каковы свойства насыщенных паров?
4. Что называется точкой росы?
5. Что называется относительной и абсолютной влажностью воздуха?
6. Как изменяется относительная и абсолютная влажность при нагревании воздуха? При его охлаждении? При выделении росы?
7. Какие способы определения влажности воздуха вам известны?

Введение

Атмосферный воздух всегда содержит водяные пары, образующиеся при непрерывном испарении воды со всех водоемов, с растительного покрова и при выдыхании.

Пары могут быть насыщенными и ненасыщенными. Пар становится насыщенным, когда достигается термодинамическое равновесие пара с жидкостью (или твердым телом) того же химического состава. Например, такое равновесие двух фаз одного и того же вещества можно осуществить, поместив некоторое количество жидкости в герметически закрытый сосуд.

Равновесие жидкости и пара наступает тогда, когда число молекул, покидающих жидкость, будет равно числу молекул, переходящих за тот же промежуток времени из пара в жидкость. Очевидно, что плотность и давление ненасыщенных паров при данной температуре всегда меньше соответствующих величин для насыщенного пара.

На рис. 1 приведено семейство экспериментальных изотерм для реального газа. Любая из изотерм, лежащая ниже изотермы при $T = T_k$, является кривой непрерывного перехода вещества из газообразного состояния в жидкое. Участок СД такой изотермы соответствует ненасыщенному пару. Из графика видно, что ненасыщенный пар с достаточной точностью подчиняется закону Бойля-Мариотта. Участок ВС изотермы соответствует насыщенному пару, находящемуся в равновесии с жидкостью. При изменении объема V давление насыщенного пара остается постоянным: уменьшение объема приводит к частичному превращению паров в жидкость. Точка В соответствует полному превращению насыщенного пара в жидкость, а участок АВ изотермы характеризует вещество в жидкой фазе. При переходе к более высоким температурам горизонтальные участки изотермы сокращаются, стягиваясь в точку при критической температуре T_k . Это значит, что объемы, а следовательно, и плотности жидкости и пара с повышением температуры сближаются между собой, пока не совпадут в критической точке. В критической точке исчезает всякое различие между жидкостью и паром.

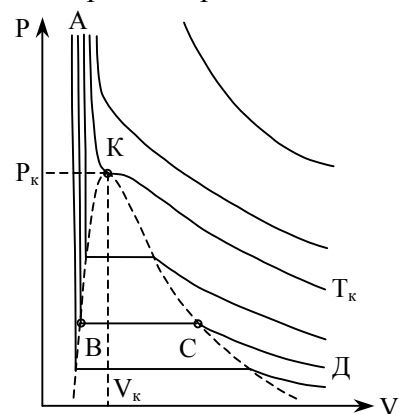


Рис. 1

На рис. 2 показана зависимость плотности жидкости (кривая АА') и плотности находящегося в равновесии с ней насыщенного пара (кривая ВВ') от температуры.

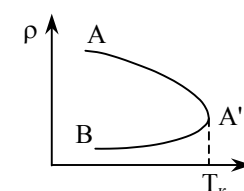


Рис. 2

Кривые АА' и ВВ' сходятся при T_k . При критической температуре становятся равными нулю теплота парообразования и коэффициент поверхностного натяжения. Давление насыщенного пара увеличивается с повышением температуры, однако не может быть больше критического (P_k) (рис. 1). Зависимость давления насыщенного пара от температуры дана на рис. 3. Кривая заканчивается в критической точке, так как при температурах выше критической понятие насыщенного пара теряет смысл.



Рис. 3

Количество водяного пара в воздухе зависит от разных факторов (географического расположения данного места, времени года, времени дня и т.п.). Слишком сухой, как и слишком влажный воздух, неблагоприятен для жизни людей и животных. Прогноз погоды невозможен без знания влажности. Для количественной характеристики влажности воздуха введены специальные величины:

1. Абсолютная влажность воздуха (обозначается часто через ρ) — масса водяного пара, содержащегося в единице объема воздуха. В зависимости от условий абсолютная влажность воздуха может принимать разнообразные значения от 0 до ρ_n , где ρ_n — абсолютная влажность воздуха, насыщенного при данной температуре водяным паром. В метеорологии абсолютную влажность характеризуют парциальным давлением P водяного пара, содержащегося в воз-

духе, выраженным в паскалях (Па).

Масса водяного пара, насыщающего 1 м³ воздуха (ρ_н), и соответствующее парциальное давление при некоторых температурах приведены в таблице 1.

Таблица 1

t, °C	ρ _н , г/м ³	P _н , Па	t, °C	ρ _н , г/м ³	P _н , Па
-30	0,33	37,4	18	15,4	2070
-15	1,38	163	19	16,3	2200
- 4	3,51	436	20	17,3	2340
0	4,84	610	21	18,3	2490
5	6,84	870	22	19,4	2640
10	9,4	1230	23	20,6	2820
15	18,8	1710	24	21,8	2980
16	13,6	1810	25	23,0	3170
17	14,5	1840	30	30,3	4240

2. Относительная влажность воздуха (обозначается часто через r) измеряется отношением абсолютной влажности (ρ) к абсолютной влажности насыщенного при данной температуре водяным паром (ρ_n) и выражается в процентах:

$$r = \frac{\rho}{\rho_n} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Относительную влажность воздуха можно выразить и через парциальные давления (упругость):

$$r = \frac{P}{P_n} \cdot 100\% , \quad (2)$$

где P_n - парциальное давление насыщенного пара, P - парциальное давление водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре.

Из уравнений (1) и (2) видно, что относительная влажность воздуха является той величиной, которая дает представление о степени насыщения воздуха водяным паром. Если, например, говорят, что относительная влажность воздуха составляет 55%, то это значит, что в данных условиях в воздухе содержится 55% того количества водяного пара, которое необходимо для его насыщения при данной температуре.

Гигиеническое значение влажности воздуха заключается в основном в ее влиянии на теплообмен организма человека с окружающей средой. Влажный воздух обладает повышенной теплопроводностью, поэтому при низкой температуре (ниже +10°C) он способствует интенсивной теплоотдаче организма, вызывает ощущение холода и часто способствует возникновению простудных заболеваний. Наоборот, при повышенной температуре влажный воздух затрудняет теплоотдачу организма, так как наличие в воздухе водяного пара препятствует испарению пота с поверхности тела (при испарении 1 г пота организм человека теряет около 2430 Дж). В теплом влажном воздухе пот, хотя и выделяется в значительных количествах, но в отсутствие движения воздуха с поверхности тела испаряется плохо. Поэтому в теплом неподвижном влажном воздухе легко наступает перегрев организма, наблюдается плохое самочувствие, ощущение духоты, изнеможения.

Сухой воздух переносится человеком значительно лучше сырого, и лишь при крайних степенях сухости наблюдается чрезмерное высыхание кожи и слизистых оболочек рта, носа и дыхательных путей.

При температуре воздуха от 15 до 25°C изменения относительной влажности воздуха в пределах от 30 до 60% не оказывают заметного влияния на теплообмен между внешней средой и организмом человека, поэтому эти показатели принимаются как гигиеническая норма влажности

воздуха для помещений с нормируемой температурой.

При температуре воздуха, превышающей 25°C, благотворное влияние на теплообмен организма человека оказывает относительная влажность воздуха порядка 20%, так как при этой влажности воздуха создаются необходимые условия для интенсивного испарения пота.

Приборы, которыми пользуются для определения влажности воздуха, - гигрометры и психрометры - бывают разнообразных типов. Большое разнообразие приборов объясняется тем, что для определения влажности воздуха разработано несколько методов, по существу отличных друг от друга. В работе будут рассмотрены следующие из них: а) метод точки росы, б) психрометрический метод, в) метод волосного гигрометра.

I. Метод точки росы

Если охлаждать воздух, сохраняя его давление постоянным, то в этих условиях парциальное давление водяного пара, содержащегося в воздухе (p), не будет меняться. Зато относительная влажность воздуха φ , равная $p/p_H \cdot 100\%$, будет возрастать, так как парциальное давление насыщенного пара P_H очень быстро уменьшается с понижением температуры. При некотором значении температуры, которую мы обозначим через t_p , водяной пар, находящийся в воздухе, станет насыщенным, и его относительная влажность достигнет 100%. В этих условиях P пара, содержащегося в воздухе, будет равно парциальному давлению водяного пара P_p , насыщенного при температуре t_p :

$$P = P_p.$$

При дальнейшем охлаждении воздуха будет наблюдаться конденсация водяного пара, который в виде мелких капель росы будет осаждаться на поверхности окружающих тел.

Температура t_p , при которой наблюдается появление

первых признаков росы, называется точкой росы. Воздух, охлажденный до точки росы, содержит водяной пар, находящийся в состоянии насыщения.

Если вначале, до охлаждения, температура атмосферного воздуха была равна t , а при его охлаждении точка росы оказалась равной t_p , то из таблицы зависимости парциального давления (упругости) насыщенного водяного пара от температуры (таблица 1) можно найти:

а) парциальное давление P_p водяного пара, насыщенного при температуре точки росы, равное, как было указано, парциальному давлению водяного пара, содержащегося в атмосферном воздухе;

б) парциальное давление (P_H) водяного пара, насыщенного при температуре атмосферного воздуха t (до его охлаждения).

На основании этих данных можно определить относительную влажность атмосферного воздуха при температуре t , которая будет равна:

$$\varphi = \frac{P_p}{P_H} \cdot 100\% . \quad (3)$$

Среди различных приборов, предназначенных для определения влажности воздуха методом точки росы, особенно простым является конденсационный гигрометр Ламбрехта, применяемый в данной лабораторной работе. Гигрометр (рис. 4) представляет собой металлический сосуд А, одна из стенок которого отполирована. Чтобы сделать появление росы более заметным, сосуд А окружен неохлаждаемым полированным кольцом В. В сосуд А наливается эфир и продувается воздух. Продувание воздуха усиливает испарение эфира, что приводит к понижению его температуры. При некоторой температуре полированная стенка сосуда А начнет покрываться матовым налетом мельчайших капелек влаги, что означает, что пары воды, находящиеся в воздухе вблизи сосуда, становятся насыщенными и час-

тично конденсируются на стенках гигрометра. Температура появления налета является точкой росы. Так как точно

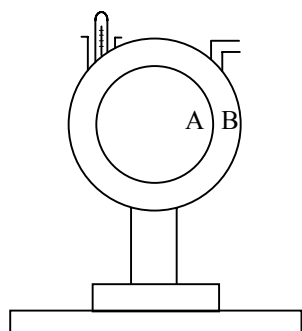


Рис. 4

уволить появление росы и ее исчезновение (после прекращения продувания воздуха) довольно сложно, то за точку росы принимают среднюю из этих двух температур. Найдя среднее из полученных значений точек росы, берут из таблицы величину P_p водяных паров, насыщающих пространство при этой температуре, получая, таким образом, величину абсолютной влажности воздуха ρ . Чтобы найти величину относительной влажности, определяют температуру комнаты t при помощи термометра, находящегося вблизи гигрометра, и находят по таблице 1 величину P_H водяных паров, насыщающих пространство при этой температуре. Относительная влажность получается как отношение этих двух величин.

Порядок выполнения работы

1. Протереть мягкой тряпочкой поверхность коробки гигрометра.

2. Налить внутрь коробки через воронку эфир так, чтобы он покрывал шарик термометра (следует иметь в виду, что эфир огнеопасен, поэтому недопустимо держать открытое пламя около прибора).

3. Медленно продуть воздух через эфир при помощи резиновой груши, наблюдая температуру t_1 , при которой поверхность начинает запотевать (появляется роса).

4. Прекратить продувание воздуха и заметить температуру, при которой роса полностью исчезает (t_2). Такого рода наблюдения произвести не менее 5 раз, стараясь воз-

можно точнее отметить температуры появления и исчезновения росы. За точку росы принять среднюю температуру $t_{cp} = (t_1 + t_2)/2$. (При работе вдвоем один должен следить за появлением и исчезновением росы, другой - наблюдать за показаниями термометра).

5. Определить температуру воздуха в комнате – t_3 при помощи другого термометра.

6. Определить по таблице значения парциальных давлений P_p и P_H водяных паров, насыщающих пространство при температуре точки росы и при комнатной температуре.

7. Вычислить относительную влажность воздуха. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

№ п/п	t_1 , °C	t_2 , °C	t_{cp} , °C	Δt_{cp} , °C	t_3 , °C	Δt_3 , °C	P_p , Па	ΔP_p , Па	γ , %
1									
2									
3									
4									
5									
Среднее значение									

Относительная погрешность в определении γ при помощи гигрометра Ламбрехта выражается формулой

$$E_\gamma = \frac{\Delta \gamma}{\gamma} = \left(\frac{\Delta P_p}{P_{p(cp)}} + \frac{\Delta P_H}{P_{H(cp)}} \right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где ΔP_p и ΔP_H - абсолютные погрешности в определении парциальных давлений насыщенных паров воды при точке росы и при комнатной температуре.

Чтобы вычислить (ΔP_p и ΔP_H), надо найти t_{cp} и t_3 . Затем по таблице 1 определить, насколько изменится $P_{p(cp)}$ и $P_{H(cp)}$, если от температуры t_{cp} и t_3 перейти к температурам

$t_{cp} + \Delta t_{cp}$ и $t_3 + \Delta t_3$. Найденные таким образом величины ΔP_p и ΔP_n подставляются в формулу (4) для определения E_T .

II. Психрометрический метод

Психрометрический метод определения влажности воздуха основан на имеющейся зависимости между скоростью испарения воды и влажностью окружающего воздуха. Практическое осуществление данного метода заключается в следующем.

Берется обычный термометр, резервуар которого обертывается кусочком батиста. Батист смачивается водой. Благодаря хорошей гигроскопичности батиста вся его поверхность становится увлажненной. Этим достигается то, что с поверхности резервуара термометра будет происходить непрерывное испарение воды.

Испарение воды вызывает охлаждение резервуара термометра, температура которого в условиях установившегося теплообмена с окружающей средой будет сохраняться постоянной. Подсчитаем приход и расход тепла для резервуара термометра.

По формуле Дальтона масса M воды, испаряющейся в течение 1 секунды с поверхности резервуара термометра, будет равна

$$M = \frac{K \cdot S \cdot (P'_H - P)}{H}, \quad (5)$$

где S - площадь испаряющей поверхности, P'_H - упругость насыщающего водяного пара при температуре испаряющейся жидкости (т.е. температуре t_1), P - упругость водяного пара, содержащегося в воздухе, H - величина атмосферного давления, K - коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от скорости движения воздуха вблизи резервуара термометра.

Отсюда видно, что количество тепла Q_1 , теряемого резервуаром термометра за единицу времени, будет равно

$$Q_1 = \lambda \cdot M = \frac{K \cdot \lambda \cdot S \cdot (P'_H - P)}{H}, \quad (6)$$

где λ - удельная теплота испарения воды.

С другой стороны, благодаря возникшей разности температур между резервуаром термометра и окружающей его средой, к резервуару термометра будет поступать количество тепла Q_2 , которое можно подсчитать по формуле Ньютона:

$$Q_2 = b \cdot S \cdot (t - t_1), \quad (7)$$

где t - температура окружающей среды, t_1 - температура резервуара термометра, S - площадь охлажденной поверхности термометра, b - коэффициент пропорциональности.

В условиях установившегося температурного режима приход тепла к резервуару термометра будет равен расходу тепла на испарение, т.е. $Q_2 = Q_1$. Отсюда

$$b \cdot S \cdot (t - t_1) = \frac{K \cdot \lambda \cdot S \cdot (P'_H - P)}{H}. \quad (8)$$

Решая это уравнение относительно P и обозначая дробь $b/K\lambda$ через α (психрометрический коэффициент), мы находим

$$P = P'_H - \alpha \cdot (t - t_1) \cdot H. \quad (9)$$

Формула (9) носит название психрометрической формулы Реньо.

Подставляя найденное выражение для P в формулу (2), мы находим

$$r = \frac{1}{P_H} [P'_H - \alpha \cdot (t - t_1) \cdot H] \cdot 100\%. \quad (10)$$

Простейшим психрометром является психрометр Августа, который состоит из двух совершенно одинаковых

термометров – "сухого" и "влажного", укрепленных на одной дощечке. Резервуар "влажного" термометра обернут кусочком батиста, кончик которого погружен в воду. Если известна величина психрометрического коэффициента α , то определение влажности воздуха сводится к измерению температуры "сухого" термометра - t , температуры "влажного" термометра - t_1 и величины атмосферного давления H . Величины P'_H и P_H могут быть найдены из таблицы зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры.

Несмотря на кажущуюся простоту психрометрического метода, его практическое осуществление осложняется тем, что величина коэффициента α , входящего в формулу Реньо (9), зависит от скорости движения воздуха в непосредственной близости от резервуара "влажного" термометра. С увеличением скорости движения воздуха α уменьшается. Это и понятно, если учесть, что скорость испарения воды с резервуара "влажного" термометра повышается с увеличением скорости движения воздуха (соответственно возрастает коэффициент K в формуле Дальтона (5), входящий в выражение для α). В таблице 3 приведены данные, характеризующие зависимость α от скорости движения воздуха для психрометра Августа. Из этой таблицы видно, что при малых скоростях движения воздуха психрометрический коэффициент меняется очень быстро. Наоборот, при больших скоростях, превышающих 2,5 м/с, он меняется мало.

Поэтому практическое применение психрометра Августа ограничивается тем, что им пользуются только для

Таблица 3

Скорость движения воздуха V , (м/с)	Психрометрический коэффициент α , (град ⁻¹)
0,13	0,00130
0,25	0,00110

0,50	0,00089
0,75	0,00081
1,00	0,00078
2,00	0,00071
3,00	0,00068
4,00	0,00067

приближенных определений влажности воздуха в закрытых помещениях, где скорость движения воздуха мала. Обычно с целью облегчения определения влажности воздуха пользуются специальной психрометрической таблицей, вычисленной на основании формулы (10). В ней при-

водится зависимость между разностью показаний "сухого" и "влажного" термометров психрометра Августа и величиной относительной влажности воздуха r для различных показаний "сухого" термометра. При составлении таблицы принимается, что $\alpha = 0,0013$ (практически неподвижный воздух). Величина атмосферного давления H берется равной 980 гПа. Так как колебания атмосферного давления обычно не превышают 2-3% величины атмосферного давления H , то определение влажности воздуха с помощью психрометрической таблицы приводит к достаточно надежным результатам.

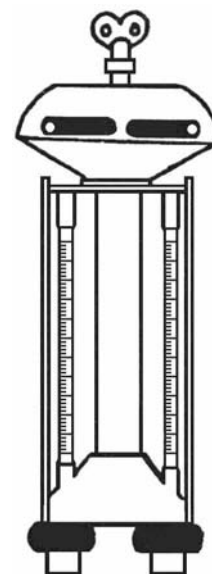


Рис. 5

Более совершенным психрометром является аспирационный психрометр Ассмана (рис. 5). Аспирационный психрометр отличается от психрометра Августа тем, что резервуары его термометров помещены в защитные металлические трубки, через них с постоянной скоростью проходит воздух, который засасывается в прибор с помощью аспирационного вентилятора, приводимого в движение часо-

вым механизмом. Блестящая поверхность трубок предохраняет термометры и от нагревания солнцем, и от излучения окружающих тел.

Величина психрометрического коэффициента для психрометра Ассмана имеет значение $\alpha = 0,00066$ при любых условиях наблюдения. Данное значение несколько отличается от того, которое мы имеем для психрометра Августа при той же скорости движения воздуха (2 м/с), это объясняется тем, что в психрометре Ассмана имеют место иные условия обтекания воздухом резервуара "влажного" термометра, чем в психрометре Августа.

При работе с аспирационным психрометром Ассмана искомое значение относительной влажности вычисляют по формуле (10). В менее ответственных случаях пользуются специальной психрометрической таблицей, в которой приведена зависимость между разностью показаний "сухого" и "влажного" термометров и величиной относительной влажности воздуха для различных показаний "сухого" термометра. При составлении данной таблицы учитывается, что для аспирационного психрометра Ассмана величина психрометрического коэффициента α составляет $0,00066 \text{ град}^{-1}$. Величина атмосферного давления 900 гПа.

Порядок выполнения работы

1. Наполнить специальную пипетку дистиллированной водой до метки.
2. Смочить матерчатую оболочку "влажного" термометра.
3. Завести часовой механизм вентилятора. Через 4 минуты после пуска вентилятора произвести отсчет температур "сухого" - t и "влажного" - t_1 термометров.
4. По анероиду определить величину атмосферного давления.

5. С помощью таблицы зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры найти величину P_H и P'_H -упругость насыщенного водяного пара для температур t и t_1 ("сухого" и "влажного" термометров).

6. По формуле Реньо (9) вычислить упругость P водяного пара, содержащегося в атмосфере.

7. По формуле (10) определить величину относительной влажности воздуха.

8. Пользуясь психрометрической таблицей для аспирационного психрометра Ассмана, найти величину относительной влажности воздуха. Относительная влажность воздуха по этой номограмме определяется как точка пересечения вертикальных прямых (температура "сухого" термометра) и наклонных прямых (температура "влажного" термометра).

Измерения провести не менее трех раз. Результаты измерений занести в таблицу 4.

Таблица 4

№ п/п	t , °C	Δt , °C	t_1 , °C	Δt_1 , °C	P_H , Па	P'_H , Па	H , Па	ΔH , Па
1								
2								
3								
Среднее значение								

Подсчитать E_r вычисленного значения r по формуле (10)¹. Сравнить значение r' , рассчитанное по формуле (10) и определенное по психрометрическим таблицам.

III. Метод волосного гигрометра

¹ ΔP и $\Delta P'$ определить, как и в предыдущем случае.

Действие волосного гигрометра основано на свойстве человеческого волоса поглощать влагу и изменять свою длину в зависимости от изменений относительной влажности воздуха. Во влажном воздухе волос, набухая, удлиняется, а в сухом воздухе - укорачивается.

Конструктивно волосной гигрометр оформляется следующим образом. Хорошо очищенный и обезжиренный конский волос верхним концом прикрепляется к рамке прибора, нижним концом - к дужке, вращающейся около оси. Дужка связана с пружиной, благодаря чему волос всегда поддерживается в натянутом состоянии. На этой же оси укреплен стрелка, связанная с дужкой. Конец стрелки перемещается вдоль шкалы с делениями, обозначающими проценты относительной влажности воздуха от 0 до 100%.

Для того чтобы волосной гигрометр давал верные показания, его время от времени проверяют, сравнивая его показания с показаниями аспирационного психрометра Ассмана.

Существенным преимуществом волосного гигрометра является то, что он позволяет определять влажность воздуха не только при положительных, но и при отрицательных температурах воздуха. Поэтому в зимних условиях волосной гигрометр служит единственным прибором, с помощью которого на метеорологических станциях производятся наблюдения за изменениями влажности воздуха.

На принципе действия волосного гигрометра основано устройство гигрографа - прибора, предназначенного для непрерывной записи изменений относительной влажности воздуха. Гигрографы применяются на метеорологических станциях, в научных лабораториях, складах.

Приемной частью гигрографа служит пучок хорошо очищенных и обезжиренных женских волос в количестве 30-40 штук. При увеличении относительной влажности воздуха пучок волос удлиняется, а при уменьшении отно-

сительной влажности воздуха - укорачивается. Изменение длины пучка волос передается при помощи рычагов стрелке, снабженной пером. Перо производит запись показаний прибора на ленте, надетой на барабан, который приводится в движение часовым механизмом. Полный оборот барабана происходит за 176 часов (1 неделя и 6 часов). Его показания периодически сверяются с показаниями психрометра Ассмана. При определении относительной влажности воздуха по гигрографу не следует трогать его руками.

Порядок выполнения работы

В задачу данной части лабораторной работы входит проверка волосного гигрографа и гигрометра, в процессе которой устанавливаются поправки к показаниям данных приборов.

Будем считать поправкой к показанию прибора величину Δr , которую необходимо прибавить к показанию прибора r' , чтобы получить истинное значение относительной влажности воздуха r . Таким образом,

$$r' + \Delta r = r,$$

отсюда

$$\Delta r = r - r'. \quad (11)$$

Поправка Δr может быть как положительной, так и отрицательной.

Результаты измерений свести в следующий протокол.

1. Проверка волосного гигрометра:

а) показание волосного гигрометра - r' (%);

б) относительная влажность воздуха, определенная с помощью аспирационного психрометра Ассмана - r (%);

в) поправка к показанию волосного гигрометра - Δr (%).

2. Проверка гигрографа:

а) показание гигрографа - r' (%);

- б) относительная влажность воздуха, определенная с помощью аспирационного психрометра Ассмана - r (%);
в) поправка к показанию гигрографа - Δr (%).

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. I. - М.: Наука, 1977. § 1.
2. Телеснин Р.В. Молекулярная физика. - М.: Высшая школа, 1965. § 63.
3. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Т. I. - М.: Наука, 1967.
4. Физический практикум (механика и молекулярная физика)/ Под ред. В.И.Ивероной. - М.: Наука, 1967. Задача 59.
5. Мэрион Дж.Б. Общая физика с биологическими примерами. - М.: Высшая школа, 1986.

Для получения зачета необходимо

1. Продемонстрировать умение определять разными методами влажность воздуха.
2. Представить отчет по установленной форме.
3. Уметь отвечать на вопросы типа:
 - а) Почему в радиопередачах метеосводки объявляют об относительной, а не об абсолютной влажности воздуха?
 - б) Чем объяснить то, что вечером после жаркого летнего дня в низменной местности наблюдается образование тумана?
 - в) На улице целый день моросит холодный осенний дождь. В комнате развесили выстиранное белье. Высохнет ли белье быстрее, если открыть форточку?
 - г) При каких условиях при росте абсолютной влажности может происходить уменьшение относительной влажности?

д) Чем объяснить то, что при открывании зимой форточки в комнату "врываються" клубы водяного тумана?

е) Почему запотевают очки, когда человек с мороза входит в комнату?

ж) Чем объяснить появление зимой инея на оконных стеклах? С какой стороны стекла он появляется? Почему?

з) Как изменится разность температур "сухого" и "влажного" термометров в психрометре при понижении температуры в комнате, если абсолютная влажность остается без изменения?

и) Почему зимой выделение тумана при дыхании заметно, а летом нет?

Дополнительные вопросы для студентов факультета технологии и предпринимательства

1. Почему открытые газопроводные трубы на зиму утепляют?
2. Какой процент влажности воздуха считается нормальным для человека, работающего в помещении механического цеха? Какое влияние оказывает на человека воздух с влажностью менее 30%? Как повысить влажность воздуха, если в помещении она составляет 20%?
3. Как влияет недостаточная относительная влажность воздуха на станки, инструменты и другие приборы в помещении?
4. Для чего желательно окрашивать фундаменты металлических станков и некоторые части станков?

Дополнительные вопросы для студентов факультетов химии, биологии, института естествознания

1. Как влияет на организм человека воздух повышенной (пониженной) влажности? Что означают термины: "воздух сухой", "воздух влажный, душный"? Дайте ха-

рактеристику комфортной (с учетом влажности) для человека среды.

2. Почему и как образуется изморозь?

3. В настоящее время насчитывают около 600 видов животных и более 400 видов растений, которые могут выполнять роль барометров, индикаторов влажности и температуры, предсказателей штормов, бурь или хорошей безоблачной погоды. Приведите известные вам примеры.

Дополнительные вопросы к работе

1. Указать температуру, при которой в комнате не может быть увеличения влажности.

2. Какова размерность постоянной психрометра?

3. Как зависит давление насыщенных паров от температуры?

4. При каком режиме работы холодильника температура наиболее медленно приближается к точке росы?

5. Вычислить плотность водяного пара, если его давление 1200 Па.

6. До какой температуры в воздухе с давлением водяного пара 800 Па охладится влажное тело?

7. Какой газ называется паром?

8. Чем отличается насыщенный пар от ненасыщенного?

9. Подчиняется ли пар газовым законам и каким?

10. Каковы устройства и принцип работы гигрометра и психрометра?

11. При температуре 300 К влажность воздуха 30%. При какой температуре влажность этого воздуха будет 50%?

12. Относительная влажность воздуха при температуре 293 К равна 44%. Что показывает влажный термометр психрометра?

13. Относительная влажность воздуха при темпера-

туре 273 К равна 40%. Выпадет ли иней, если температура почвы понизится до 265 К? Почему?

14. Относительная влажность:

а) увеличивается с повышением температуры;

б) равна значению давления насыщенного пара;

в) при точке росы равна 100%;

г) указанные положения не действительны.

Выберите правильный ответ.

15. Как можно уменьшить относительную влажность воздуха в цехе, несмотря на увеличение абсолютной влажности?

Работа № 11. **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ
ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА
МЕТОДОМ КЛЕМАНА-ДЕЗОРМА**

Цель работы: опытное определение отношения теплоемкости воздуха при постоянном давлении C_p к теплоемкости при постоянном объеме C_v методом адиабатического расширения.

Принадлежности: прибор Клемана-Дезорма, манометр, секундомер, ручной насос.

**Вопросы, знание которых обязательно для допуска
к выполнению работы**

1. Что такое идеальный газ? Какие макроскопические и микроскопические параметры характеризуют состояние газа?
2. Какой процесс называется изотермическим, изобарическим, изохорическим, адиабатическим? Приведите их графики в координатах P-V; P-T; V-T.
3. Что называется удельной (молярной) теплоемкостью?
4. Почему теплоемкость газов зависит от процесса?
5. Что понимают под числом степеней свободы молекул?
6. Сформулируйте первое начало термодинамики.
7. Какой принцип положен в основу вычисления C_p/C_v в данной работе?
8. Знать порядок выполнения работы.

В в е д е н и е

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела на один градус, называют *теплоемкостью тела*. Количество теплоты, необходимое для нагревания единицы массы вещества на один градус, называют *удельной теплоемкостью тела*.

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dT}. \quad (1)$$

Формула (1) представлена в дифференциальной форме потому, что удельная теплоемкость реальных тел и газов зависит от температуры. Поскольку количество теплоты зависит от процесса, то и теплоемкость существенно зависит от процесса.

Молярная теплоемкость вещества – теплоемкость одного моля этого вещества:

$$C = \frac{\mu}{m} \cdot \frac{dQ}{dT}, \quad (2)$$

$$c = \frac{C}{\mu}, \quad (3)$$

где μ - молярная масса.

Рассмотрим теорию теплоемкости идеального газа.

Величина теплоемкости, характеризующая свойства газов, не является для данного газа величиной постоянной, а зависит от условий, при которых происходит нагревание. Эту зависимость можно получить, воспользовавшись первым началом термодинамики, которое формулируется следующим образом:

Количество теплоты dQ , переданное системе, затрачивается на увеличение ее внутренней энергии dU и на работу dA , совершаемую системой против внешних сил:

$$dQ = dU + dA = dU + PdV. \quad (4)$$

Если нагревание газа происходит при постоянном объеме, то газ не совершает работы ($PdV = 0$) и, следовательно, согласно первому началу термодинамики, все количество теплоты идет на увеличение внутренней энергии газа:

$$dQ = dU. \quad (5)$$

Внутренняя энергия одного моля идеального газа

$$U = \frac{i}{2} RT, \quad (6)$$

где i – число степеней свободы молекулы газа, R – универсальная газовая постоянная.

Теплоемкость одного киломоля идеального газа при постоянном объеме

$$C_V = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} R. \quad (7)$$

Если нагревание газа происходит при постоянном давлении, то газ, расширяясь, совершает положительную работу против внешних сил. В соответствии с первым началом термодинамики (4) при изобарическом процессе подведенное количество теплоты расходуется на изменение внутренней энергии газа (dU) и совершение работы (dA), связанное с расширением газа:

$$dQ = dU + PdV. \quad (8)$$

Из уравнения Клапейрона

$$PV = RT \quad (9)$$

следует

$$PdV = RdT \quad (10)$$

и

$$dQ = dU + RdT. \quad (11)$$

Отсюда молярная теплоемкость при постоянном давлении

$$C_P = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} + R, \quad (12)$$

где $C_V = \frac{dU}{dT}$ – молярная теплоемкость при постоянном объеме. Следовательно,

$$C_P = C_V + R. \quad (13)$$

Это – уравнение Майера, связывающее теплоемкости изобарного и изохорного процессов: молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении больше

молярной теплоемкости при постоянном объеме на величину универсальной газовой постоянной R .

В классической теории теплоемкость идеального газа определяется числом степеней свободы молекул и не зависит от температуры. Для одноатомного газа ($i = 3$) $C_V = \frac{3}{2} R$, $C_P = \frac{5}{2} R$; для двухатомного ($i = 5$) $C_V = \frac{5}{2} R$, $C_P = \frac{7}{2} R$.

Если процесс перехода системы из одного состояния в другое протекает без теплообмена с окружающей средой, то такой процесс называется адиабатическим. При таком процессе уравнение (4) примет вид

$$dU + dA = 0$$

или

$$dA = -dU, \quad (14)$$

т.е. при адиабатическом расширении или сжатии работа совершается газом только за счет изменения запаса внутренней энергии. Уравнение адиабатического процесса (уравнение Пуассона) может быть выведено следующим образом. Поскольку $dA = PdV$, а $dU = C_V dT$, то уравнение (14) принимает вид:

$$PdV = -C_V dT. \quad (15)$$

Разделив это уравнение на (9), получим

$$\frac{dV}{V} = -\frac{C_V}{R} \cdot \frac{dT}{T}$$

или

$$\frac{R}{C_V} \frac{dV}{V} + \frac{dT}{T} = 0. \quad (16)$$

Учитывая уравнение Майера, получим выражение для множителя $\frac{R}{C_V} = \frac{C_P - C_V}{C_V} = \frac{C_P}{C_V} - 1$.

Если обозначить $\frac{C_P}{C_V} = \gamma$, то уравнение (16) примет

вид

$$(\gamma - 1) \frac{dV}{V} + \frac{dT}{T} = 0. \quad (17)$$

Интегрируя и потенцируя уравнение (17), находим

$$\ln V^{\gamma-1} + \ln T = \text{const},$$

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{const}. \quad (18)$$

Используя уравнение состояния (9), получим уравнение Пуассона

$$P \cdot V^{\gamma} = \text{const}. \quad (18)$$

Величина γ зависит только от числа степеней свободы молекул, из которых состоит газ.

Значения удельной теплоемкости некоторых газов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Газ	C_v , Дж/кг К	C_p , Дж/кг К	$\gamma = C_p/C_v$
He	3134	5202	1.66
Ar	314	524	1.67
H ₂	10061	14186	1.41
N ₂	739	1037	1.40
O ₂	651	912	1.40
CO	739	1037	1.40
NH ₃	1672	2190	1.31
CO ₂	639	833	1.30

Адиабатический процесс можно осуществить на следующей установке (рис. 1). В большой закрытый баллон Б, соединенный с U-образным открытым водяным манометром М, насосом Н нагнетается воздух. Через время t в нем установится давление

$$P_1 = H + h_1, \quad (20)$$

где H - атмосферное давление; h_1 - избыток давления воздуха в баллоне над атмосферным H , измеряемый манометром и равный разности уровней жидкости в манометре.

Затем, если открыть кран П, то сжатый воздух быстро выйдет наружу, так как кран имеет довольно большое отверстие.

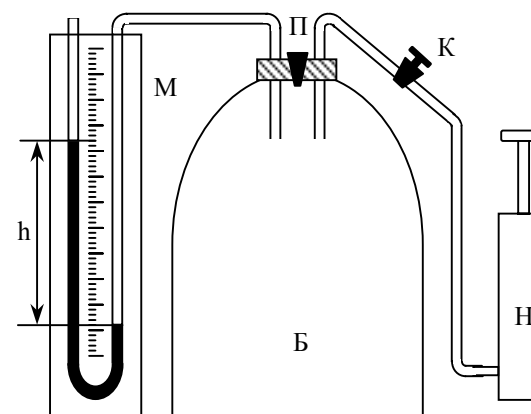


Рис. 1

Как только давление в баллоне снизится и станет равным атмосферному (H) - кран быстро закрывают. Такой процесс расширения можно считать адиабатическим, так как он протекает быстро и потому без теплообмена.

Пусть масса воздуха после накачивания насосом в баллоне объемом V_1 равна m . При открывании крана часть воздуха (Δm) выходит. Тогда масса оставшегося воздуха $m_1 = m - \Delta m$. Масса воздуха m_1 , которая заключается в объеме V_1 , занимала перед открытием крана меньший объем V_2 . Таким образом, уравнение (19) для массы газа m_1 в нашем случае, примет вид:

$$H V_1^{\gamma} = P_1 V_2^{\gamma}, \quad (21)$$

где H и V_1 - давление и объем воздуха в конце процесса; P_1 и V_2 - давление и объем той же массы газа в начале процесса.

При адиабатическом расширении воздух в сосуде несколько охладится, но через некоторое время вследствие теплопроводности стенок температура воздуха начнет изохорически повышаться и снова станет равной температуре окружающей среды, а давление поднимется до величины $P_2 = H + h_2$ (h_2 - дополнительное давление, измеряемое манометром).

Начальное и конечное состояния газа наблюдаются при одинаковой температуре. Поэтому на основании закона Бойля-Мариотта получим

$$P_1 V_2 = P_2 V_1. \quad (22)$$

Решив соответственно уравнения (21) и (22), получим

$$\frac{H}{P_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^\gamma. \quad (23)$$

Логарифмируя (23), найдем

$$\lg H - \lg P_1 = \gamma (\lg P_2 - \lg P_1),$$

откуда

$$\gamma = \frac{\lg P_1 - \lg H}{\lg P_1 - \lg P_2}. \quad (24)$$

Поскольку на практике давления H , P_1 и P_2 незначительно отличаются друг от друга, то в последней формуле разности логарифмов можно заменить разностями самих величин:

$$\gamma = \frac{P_1 - H}{P_1 - P_2}. \quad (25)$$

Если учесть, что $P_1 = H + h_1$, а $P_2 = H + h_2$, из уравнения (25) получим расчетную формулу для данного опыта:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (26)$$

Рассмотренный метод определения отношения C_p/C_v может дать значение, близкое к табличному, только для случая малых сжатий и расширений газа в сосуде.

Порядок выполнения работы

1. В стеклянный баллон накачайте немного воздуха. Когда разность уровней в манометре станет максимальной,

перекройте кран К. При закачивании воздуха совершается работа против сил давления газа, что приводит к увеличению его внутренней энергии, а следовательно, и температуры. Необходимо выждать 2-3 минуты (пока за счет теплообмена температура в баллоне не станет равной комнатной, при этом установится давление воздуха и разность уровней жидкости в манометре перестанет меняться), измерить манометром избыточное давление воздуха h_1 .

2. Откройте кран П, соединяющий стеклянный баллон с атмосферой, и в тот момент, когда уровни жидкости в обоих коленах манометра М сравняются, быстро закройте кран. При этом происходит адиабатическое расширение воздуха, и чтобы оно было ближе к идеальному, п. 2 необходимо выполнить максимально быстро.

3. Выждав 2-3 минуты, пока газ, охлажденный при адиабатическом расширении, нагреется до комнатной температуры и давление окончательно установится, измерить избыточное давление² h_2 .

4. По формуле (26) вычислить значение γ .

5. Опыт повторите не менее 5 раз, изменяя всякий раз величину h_1 и определяя γ , рассчитайте среднее значение $\gamma_{\text{ср}}$.

6. Если несколько первых значений γ существенно отличаются друг от друга и от табличного, то это означает отсутствие навыка в проведении опыта (пробка закрывается слишком рано или слишком поздно). В этом случае для вычисления γ следует применить метод экстраполяции. Для этого необходимо провести все те же измерения, что и в пунктах 1-4, но пробку вынимать не на 1-2 с, а на большие промежутки времени, отсчитываемые по секундомеру (пробку вынимать на 5, 10, 15 и 20 с). Первоначальное из-

² Следует помнить, что h_1 и h_2 отсчитываются как разность высот жидкости в обоих коленах U-образного манометра.

быточное давление по возможности устанавливать одно и то же. Опыт повторить по 3 раза для каждого промежутка времени. Данные измерений занести в таблицу 2. После этого построить график зависимости $\gamma_{\text{ср}} = f(t)$. Экстраполируя (продолжая) график к $t = 0$, найдите γ .

7. Подсчитать абсолютную и относительную погрешность в определении γ .

8. Рассчитать охлаждение газа ΔT при адиабатическом расширении. (Атмосферное давление определить по показаниям барометра; давление, измеренное в мм водяного столба, перевести в единицы СИ).

Таблица 2

t, с	№ опыта	h ₁ , см	h ₂ , см	γ	$\gamma_{\text{ср}}$
5	1				
	2				
	3				
среднее					
10	1				
	2				
	3				
среднее					
15	1				
	2				
	3				
среднее					
20	1				
	2				
	3				
среднее					

9. Определить удельную (молярную) теплоемкость воздуха при постоянном объеме и постоянном давлении ($\mu_{\text{возд}} = 0.029$ кг/моль).

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. - М.: Наука, 1987.
2. Мелешко Л.О. Молекулярная физика и введение в термодинамику. - Минск: Высшая школа, 1977.
3. Грабовский Р.Н. Курс физики. - М.: Высшая школа, 1970. § 42-44.
4. Мэрион Дж.Б. Общая физика с биологическими примерами. - М.: Высшая школа, 1986. Гл. 8, 9.
5. Ланина И.Я., Соломин В.П. Экскурсии в природу по физике и биологии. - СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 1998.
6. Каленникова Т.Г. Природа и ты. (Вопросы и задания по экологии). - Минск: Народная Асвета, 1989.

Для получения зачета необходимо

1. Продемонстрировать умение экспериментально определять отношения теплоемкостей C_p/C_v .
2. Представить отчет по установленной форме.
3. Уметь отвечать на вопросы типа:
 - а) Раскройте понятия внутренней энергии и теплоты. Какова связь между ними?
 - б) Является ли теплоемкость идеального газа функцией процесса (состояния)? Что больше - C_p или C_v и почему?
 - в) Представьте графически в координатах P-V последовательно все процессы, происходящие с газом.
 - г) Каков физический смысл универсальной газовой постоянной; постоянной Больцмана?
 - д) Что происходит с внутренней энергией газа при адиабатическом процессе?

е) Как и почему изменяется температура газа в баллоне в данном эксперименте?

ж) Почему в данной установке манометр наполняют спиртом (или водой), а не ртутью?

Дополнительные вопросы для студентов факультета технологии и предпринимательства

1. До изобретения спичек для добывания огня иногда пользовались "воздушным огнем" (рис. 2). Быстро вдвигая поршень в толстостенную трубку, заставляли вспыхнуть внутри трубки легко воспламеняющуюся вату. На чем основано действие этого прибора?

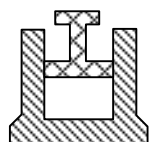


Рис. 2

2. Для получения газированной воды через воду пропускают сжатый углекислый газ. Почему температура при этом несколько понижается?

3. Объяснить, почему топливо, подаваемое в цилиндр дизеля в конце второго такта (т.е. в момент максимального сжатия воздуха), воспламеняется?

Дополнительные вопросы для студентов факультетов химии, биологии, института естествознания

1. Определите число степеней свободы воздуха.

2. Покажите, что отношение C_p/C_v зависит лишь от числа степеней свободы.

3. Из каких газов состоит воздух? Опишите влияние на человека парциального давления различных газов, входящих в состав воздуха.

Дополнительные вопросы к работе

1. Если вы плаваете летним вечером, то ощущаете, что

вода теплая, хотя воздух достаточно холодный. Почему?

2. Возможна ли отрицательная удельная теплоемкость? Объясните.

3. Добавление 20 килокалорий повысит температуру трех литров воды на: а) 2 °С; б) 3 °С; в) 4 °С; г) 5 °С. Выберите правильный ответ.

4. Почему охлаждение водяных паров происходит быстрее на большой высоте в атмосфере Земли?

5. Почему при работе мощного компрессора необходимо охлаждать его цилиндры?

Работа № 12. **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА**

Цель работы: научиться экспериментально определять коэффициент вязкости воздуха.

Принадлежности: U-образный манометр, резиновая груша, секундомер, капилляр, микроскоп.

Вопросы, знание которых обязательно для допуска к выполнению работы

1. Какие явления переноса вам известны?
2. Объясните явления переноса с точки зрения молекулярно-кинетической теории.
3. Что такое средняя длина свободного пробега молекул газа?
4. Объясните молекулярно-кинетический механизм вязкости.
5. Что называется коэффициентом вязкости? В каких единицах он измеряется?
6. Что называется ламинарным (турбулентным) течением жидкостей и газов?
7. На чем основан метод определения коэффициента вязкости в этой работе?

Введение

Газ представляет собой совокупность беспорядочно движущихся молекул. Хаотический характер теплового движения молекул определяет такие явления в газах, как вязкость, теплопроводность, диффузия. Эти явления носят общее название - явления переноса. Кратко рассмотрим их.

1. Если сосуд разделить на две части перегородкой, непроницаемой для газов, и поместить туда различные газы, а потом перегородку убрать, то через некоторое время в

результате теплового движения молекул произойдет смешение газов, в результате чего образуется их однородная смесь. Процесс переноса материи из одних частей объема в другие, обусловленный тепловым движением молекул, называется диффузией.

2. Представим себе две параллельные пластины, между которыми находится некоторый газ. Пусть верхняя пластина в начальный момент времени имеет более высокую температуру по сравнению с нижней (в этом случае перенос теплоты конвекцией исключается). В результате теплового движения происходит переход теплоты от нагретой пластины к холодной и через некоторое время температуры обеих пластин уравниваются. Процесс переноса теплоты (или тепловой энергии) из одних частей объема в другие, обусловленный тепловым движением молекул, называется теплопроводностью.

3. И наконец, представим себе слой конечной толщины - объем, заключенный между двумя параллельными бесконечными плоскостями, движущимися с определенной скоростью V относительно других слоев рассматриваемого объема газа. Это значит, что молекулы этого слоя, участвуя в беспорядочном тепловом движении, одновременно смещаются в направлении вектора \vec{V} со скоростью V . Так как выделенный слой никакими непроницаемыми перегородками не отделяется от других слоев газа, то молекулы этого слоя в результате теплового движения могут свободно переходить в другие слои, перенося туда с собой в единицу времени количество движения $n \cdot m \cdot \vec{V}$, где m - масса молекулы, n - число молекул, перешедших из рассматриваемого слоя в единицу времени. В свою очередь, молекулы других слоев газов, большинство которых имеет скорости меньше \vec{V} , обогащают выделенный слой "медленными" молекулами. В результате этого скорость движения слоя уменьшается, то есть слой "замедляется", затормаживается. Процесс переноса

вается. Процесс переноса количества движения из одних частей объема в другие, обусловленный тепловым движением молекул, называется внутренним трением или вязкостью газа.

Из этих определений видно, что все явления переноса имеют общий механизм: происходит перенос какой-то величины, характеризующей вещество (масса, энергия, количество движения), из одних частей объема в другие до тех пор, пока данная величина не распределится равномерно по всему объему. В том случае, когда в объеме имеются источники переносимой величины, явления переноса приводят к установлению в объеме динамического равновесия. Примером такого динамического равновесия является: движение жидкости или газа по трубе под действием постоянной разности давлений.

Вследствие общности явлений переноса ограничимся выводом уравнения переноса количества движения, называемого уравнением вязкости. Рассмотрим газовый поток, движущийся в направлении оси Y , величина скорости V которого изменяется вдоль оси X , перпендикулярной к Y . Для дальнейших рассуждений необходимо ввести понятие градиента переменной величины. Если $V(x, y, z)$ - есть скалярная функция переменных x, y, z , то градиент функции указывает в каждой точке пространства величину и направление (т.е. векторная величина), в котором эта скалярная функция изменяется максимально быстро, и равен приближенно отношению приращения этой функции к длине смещения в этом направлении. В нашем случае градиент скорости направлен вдоль оси X и его величина равна:

$$\text{grad } V = \frac{\Delta V}{\Delta x}. \quad (1)$$

Предположим для простоты, что скорость линейно меняется от слоя к слою в направлении X , то есть $\text{grad } V = \text{const}$. Разобьем поток газа на отдельные слои, как изобра-

жено на рис. 1.

Мысленно выделим элементарную площадку dS , расположенную в плоскости YOZ . Для простоты предполагаем, что площадку dS пересекают один раз только те мо-

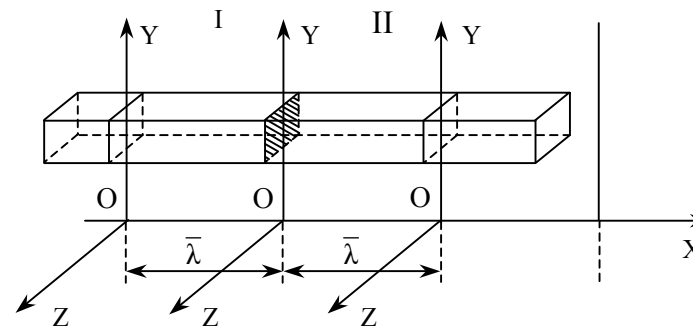


Рис. 1

лекулы, которые прошли путь, равный средней длине свободного пробега молекулы $\bar{\lambda}$, и только они могут привести к переносу количества движения через площадку dS . При этом принимаются в расчет только молекулы, падающие перпендикулярно к площадке dS . Если число молекул в единице объема равно n и средняя скорость теплового движения молекул \bar{c} , то число молекул, пересекающих элементарную площадку dS в одном направлении, равно числу молекул, заполняющих параллелепипед с высотой $\bar{c} \cdot dt$ и основанием dS , деленному на 6 в предположении изотропного распределения молекул по направлениям движения при тепловом движении:

$$\frac{1}{6} n \cdot \bar{c} \cdot dS \cdot dt. \quad (2)$$

В расчет принимаются молекулы, прошедшие через площадку из параллелепипедов I и II, расположенных справа и слева от площадки dS на расстоянии $\bar{\lambda}$, как изображено на рис. 1. Скорость потока газа в элементарном

объеме I равна $V_1 = V - \bar{\lambda} \frac{\Delta V}{\Delta x}$ и в элементарном объеме II:

$V_2 = V + \bar{\lambda} \frac{\Delta V}{\Delta x}$. Отсюда нетрудно вычислить количество движения, переносимое молекулами справа и слева через площадку dS за время dt :

$$dP_2 = \frac{1}{6} m \cdot V_2 \cdot n \cdot \bar{c} \cdot dS \cdot dt, \quad (3)$$

$$dP_1 = \frac{1}{6} m \cdot V_1 \cdot n \cdot \bar{c} \cdot dS \cdot dt. \quad (4)$$

Так как скорости V_1 и V_2 неодинаковы, получится избыток количества движения, переносимого через площадку dS :

$$dP = dP_1 - dP_2 = -\frac{1}{3} m \cdot n \cdot \bar{c} \cdot \bar{\lambda} \frac{\Delta V}{\Delta x} dS \cdot dt. \quad (5)$$

Произведение массы молекулы на число молекул в единице объема есть масса единицы объема, т.е. плотность газа $\rho = m \cdot n$. Отсюда получается окончательное уравнение в следующем виде:

$$dP = -\eta \frac{\Delta V}{\Delta x} dS \cdot dt, \quad (6)$$

где $\eta = \frac{1}{3} \rho \cdot \bar{c} \cdot \bar{\lambda}$ - коэффициент вязкости. Уравнение (6) называется уравнением вязкости или уравнением переноса количества движения. В системе СИ размерность $[\eta]$ Па·с.

В данной работе коэффициент вязкости η воздуха определяется путем исследования ламинарного движения потока воздуха через тонкий капилляр. Если предположить постоянство плотности воздуха по всей длине капилляра, то, пользуясь уравнением вязкости (6), можно получить формулу, связывающую коэффициент вязкости с параметрами капилляра, разностью давлений на его концах ($P_1 - P_2$), временем истечения t и объемом вытекающего газа V за

это время. Эта формула вязкости в молекулярной физике называется формулой Пуазейля:

$$V = \frac{1}{\eta} \frac{\pi R^4}{8l} (P_1 - P_2), \quad (7)$$

где R - радиус капилляра, l - длина капилляра. Эта формула положена в основу экспериментального измерения коэффициента вязкости воздуха в данной работе.

Порядок выполнения работы

Вязкость воздуха предлагается определить с помощью прибора, представляющего собой U-образный манометр (рис. 2), к одному из колен которого присоединен капилляр

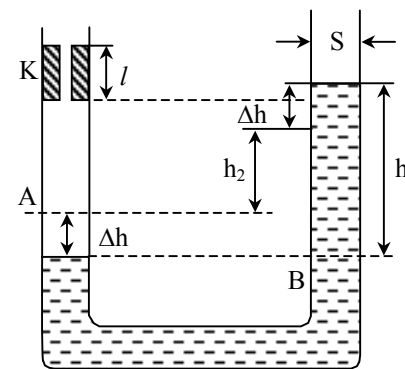


Рис. 2

К. Если поднять с помощью резиновой груши столб жидкости в одном из колен манометра выше, чем в другом, то в этом случае давление воздуха в колене будет больше атмосферного, и между началом и концом капилляра возникает перепад давлений. Предоставим воздуху возможность вытекать из колена A через капилляр K под действием этого перепада давления. Поскольку воздух имеет вязкость, а капилляр взят тонкий, то уровень жидкости в колене B будет опускаться сравнительно медленно. Для определения вязкости будем исходить из формулы Пуазейля (7), откуда

$$\eta = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2) \cdot t}{8V}, \quad (8)$$

где $V = \Delta h S$, но $h_1 = h_2 + 2\Delta h$, $V = \frac{h_1 - h_2}{2} \cdot S$, $\Delta h = \frac{h_1 - h_2}{2}$.

Однако по мере вытекания воздуха перепад давлений будет меняться. Поэтому лучше подставить в формулу Пуазейля средний перепад давления $\Delta P_{\text{ср}}$, причем для простоты при небольшом ущербе для точности можно взять среднее арифметическое значение ΔP : $\Delta P_{\text{ср}} = (\Delta P_0 - \Delta P_t)/2$, где ΔP_0 - перепад давлений в начале отсчета времени, ΔP_t - перепад давлений в конце отсчета, равный $\Delta P_t = (h_2 \cdot S \cdot \rho \cdot g)/2$, ρ - плотность жидкости, g - ускорение силы тяжести. Таким образом, выражение для среднего давления за время опыта примет такой вид:

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_t + \Delta P_0}{2} = \frac{(h_1 + h_2) \cdot \rho \cdot g}{2}. \quad (9)$$

С учетом этого выражение (8) примет вид:

$$\eta = \frac{\pi \cdot R^4 \left(\frac{\Delta P_0 + \Delta P_t}{2} \right) \cdot t}{g \cdot l \cdot \left(\frac{h_1 - h_2}{2} \right) \cdot S} = \frac{\pi \cdot R^4 (h_1 + h_2) \cdot \rho \cdot g \cdot t}{g \cdot l \cdot (h_1 - h_2) \cdot S}. \quad (10)$$

Таким образом, для экспериментального определения коэффициента вязкости нужно измерить:

- 1) h_1, h_2 - разность уровней жидкости в манометре в начале и в конце опыта;
- 2) l - длину капилляра;
- 3) t - время наблюдения;
- 4) R - радиус капилляра.

Для измерения диаметров трубки и капилляра используются прилагаемые к установке коротенькие кусочки этого капилляра и этой же трубки. Диаметр капилляра измеряется с помощью микроскопа, диаметр трубки манометра - с помощью компаратора (микрометра). Опыт провести не менее 5 раз. Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица

№ опыта	h_1 , м	h_2 , м	l , м	t , с	R , м	η , кг/с·м	Примечание
---------	-----------	-----------	---------	---------	---------	-----------------	------------

1							
2							
3							
4							
5							
Среднее значение							

Подсчитать абсолютную и относительную погрешности в определении коэффициента вязкости.

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. I. - М.: Наука, 1977. § 128, 129, 130.
2. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. - М.: Наука, 1976. § 35, 36, 48, 49, 50.
3. Грабовский Р.И. Курс физики. - М.: Высшая школа, 1980. § 48-52.
4. Мэрион Дж.Б. Общая физика с биологическими примерами. - М.: Высшая школа, 1986. Гл. 7, 8, 9.

Для получения зачета необходимо

1. Продемонстрировать умение определять коэффициент вязкости воздуха с помощью U-образного манометра.
2. Представить отчет по установленной форме.
3. Уметь отвечать на вопросы типа:
 - а) Выведите формулу Пуазейля для газов.
 - б) Почему коэффициент внутреннего трения жидкостей убывает с понижением температуры, а у газов - возрастает?
 - в) Чем обусловлен знак "минус" в правой части уравнения переноса (внутреннего трения)?
 - г) Чем обусловлено внутреннее трение в газе?

д) Как зависит от времени сила внутреннего трения в газе?

е) Зависит ли от давления коэффициент вязкости?

ж) Чему равно отношение коэффициента теплопроводности к коэффициенту внутреннего трения?

з) Два твердых тела имеют одинаковые размеры и форму, но различны по плотности, сопротивление же воздуха действует на них одинаково. Покажите, что, если, находясь на одинаковой высоте, они освободятся от связей одновременно, то более тяжелое тело достигнет Земли первым.

Дополнительные вопросы для студентов факультетов химии, биологии, института естествознания

1. Известно, что воздух состоит из смеси газов. Дайте характеристику этих газов. Что следует понимать под η ?

2. Какое течение называется ламинарным?

3. При чуме артерия сужается и ее эффективный радиус уменьшается на 20%. За счет чего можно понизить давление, чтобы поддержать прежний поток крови?

Работа № 13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы: экспериментально определить коэффициент вязкости неизвестной жидкости, используя метод падающего шарика.

Принадлежности: стеклянный цилиндр на подставке с исследуемой жидкостью, микрометр, набор шариков, пинцет, торсионные весы, масштабная линейка, секундомер.

Вопросы, знание которых обязательно для допуска к выполнению работы

1. Чем, по представлениям молекулярно-кинетической теории строения вещества, объясняется различие между газом и жидкостью?
2. В чем отличие реальной жидкости от идеальной?
3. Объясните молекулярно-кинетический механизм вязкости.
4. В каких единицах измеряется коэффициент вязкости?
5. От чего зависит коэффициент вязкости?
6. Каким уравнением описывается сила внутреннего трения между слоями жидкости, движущимися с разными скоростями?
7. Сформулируйте законы Стокса и Пуазейля.
8. Применимы ли уравнения переноса, полученные для газа и для жидкости?
9. Каков физический смысл коэффициента вязкости?
10. Знать порядок выполнения работы.

Введение

Рассмотрим механизм возникновения внутреннего трения (вязкости) в жидкостях. Молекулы в жидкостях, ин-

тенсивно взаимодействуя между собой, находятся на значительно меньших расстояниях относительно друг друга, чем молекулы газа.

Характер теплового (хаотического) движения молекул в жидкостях существенно отличается от теплового движения молекул газа. Молекулы жидкости большую часть времени колеблются около своего положения равновесия. Вследствие хаотичности движения скорости и амплитуды колебаний соседних молекул различны, и время от времени соседние молекулы расходятся настолько, что некоторые из них оказываются на расстояниях порядка диаметра молекул (перескакивают) и начинают колебаться около нового положения равновесия.

При течении реальной жидкости отдельные слои ее воздействуют друг на друга с силами, касательными к этим слоям. Это явление называют внутренним трением или вязкостью.

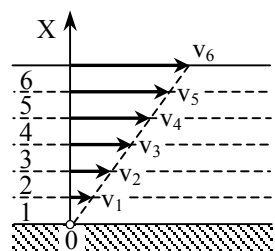


Рис. 1

Рассмотрим течение вязкой жидкости по горизонтальному руслу. Условно представим жидкость в виде нескольких слоев 1, 2, 3, 4, 5, 6. Слой вязкой жидкости, непосредственно граничащий с горизонтальным руслом, «прилипает» к нему и неподвижен. По мере удаления от дна скорость слоев жидкости нарастает ($v_1 < v_2 < v_3 < v_4 < v_5 < v_6$). Максимальная скорость будет у слоя, который граничит с воздухом. Слои воздействуют друг на друга. Более быстрый слой ускоряет соседний с ним более медленный и, наоборот, более медленный задерживает более быстрый.

Вязкость проявляется в форме силы, препятствующей относительному движению слоев жидкости, касательной к слоям. Сила внутреннего трения, действующая между двумя слоями, пропорциональна площади соприкосновения

взаимодействующих слоев и тем больше, чем больше их относительная скорость. Принято выражать силу в зависимости от изменения скорости, приходящегося на единицу длины в направлении, перпендикулярном скорости, т.е. от величины dv/dy , называемой градиентом скорости (формула Ньютона):

$$F = \eta \frac{dv}{dy} S. \quad (1)$$

Величина η называется коэффициентом внутреннего трения или коэффициентом динамической вязкости. Если в (1) положить численно $dv/dy = 1$ и $S = 1$, то $\eta = F$, т.е. коэффициент динамической вязкости численно равен силе внутреннего трения, возникающей на каждой единице поверхности соприкосновения двух слоев, движущихся один относительно другого с градиентом скорости, равным единице. В системе СИ η измеряется в Па·с. Это такая вязкость, при которой на слой площадью в 1 м^2 действует сила в 1 Н при градиенте скорости 1 м/с на каждый метр длины.

Из молекулярно-кинетической теории следует, что существование внутреннего трения связано с переносом количества движения молекулами из слоя в слой вследствие теплового движения. В газах перенос количества движения происходит при переходе молекул из одного слоя в другой, что и определяет внутреннее трение между слоями. В жидкостях молекулы большую часть времени находятся около положения равновесия и этот механизм играет незначительную роль. Основной причиной возникновения сил трения в жидкостях является сильное взаимодействие между молекулами отдельных слоев. Движущийся слой жидкости увлекает соседние слои в основном за счет сил сцепления. Коэффициент вязкости жидкости зависит от природы жидкости и от температуры. С ростом температуры коэффициент вязкости жидкости уменьшается (у

газов возрастает). Зависимость его от температуры жидкости дается формулой Френкеля:

$$\eta = B \cdot \exp\left(\frac{E}{kT}\right), \quad (2)$$

здесь B - константа, k - постоянная Больцмана, E - энергия активации: минимальная энергия, необходимая молекуле для преодоления сил взаимодействия с ближайшим окружением и перескока в новое положение равновесия. Величина $E \sim (2-3) \cdot 10^{-20}$ Дж, поэтому при нагревании жидкости на 10 градусов вязкость падает на 20-30%. В таблице 1 приведены некоторые характерные значения вязкости.

Таблица 1

Вещество	Температура, °C	η , Па·с
Воздух	0	$1.71 \cdot 10^{-5}$
	20	$1.84 \cdot 10^{-5}$
	40	$1.96 \cdot 10^{-5}$
Вода	0	$1.79 \cdot 10^{-3}$
	20	$1.00 \cdot 10^{-3}$
	40	$6.56 \cdot 10^{-4}$
Глицерин	-42	6710
	20	1.49
Кровь	37	$4.0 \cdot 10^{-3}$

Коэффициент вязкости жидкости может быть определен методом падающего шарика в вязкой среде (метод Стокса).

Рассмотрим свободное падение тела (в нашем случае - свинцового шарика) в вязкой покоящейся жидкости, простирающейся безгранично по всем направлениям. На шарик, свободно падающий в такой жидкости, не оставляющий за собой никаких завихрений (это реализуется при малых скоростях падения шариков малых размеров), действуют три силы:

1. Сила тяжести (P):

$$P = mg = V \cdot \rho_2 \cdot g = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \rho_2 \cdot g, \quad (3)$$

где r - радиус шарика; ρ_2 - плотность шарика; g - ускорение свободного падения; m - масса шарика; V - объем шарика.

2. Выталкивающая сила (сила Архимеда, F_1):

$$F_1 = V \rho_1 g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g, \quad (4)$$

где ρ_1 - плотность жидкости.

3. Сила сопротивления движению (F_2 , обусловленная силами внутреннего трения между слоями жидкости):

$$F_2 = 6 \pi \eta r v, \quad (5)$$

где v - скорость слоев жидкости (скорость шарика).

Следует учесть, что здесь играет роль не трение шарика о жидкость, а трение отдельных слоев жидкости друг о друга, поскольку при соприкосновении твердого тела с жидкостью к поверхности тела сразу же прилипают молекулы жидкости. Тело обволакивается слоями жидкости и связано с ними межмолекулярными силами. Непосредственно прилегающий к телу слой жидкости движется вместе с телом со скоростью движения тела. Он увлекает в своем движении соседние слои жидкости, которые на некоторый период времени приходят в плавное безвихревое (ламинарное) движение (если скорость движения мала и диаметр шариков мал). Направление указанных выше сил показано на рис. 2. На основании второго закона Ньютона имеем

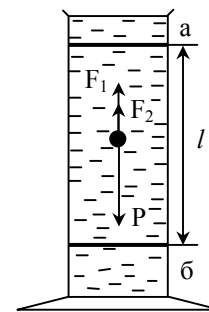


Рис. 2

математически: $m \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_2 g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g - 6 \pi \eta r v$. (6)

Вначале шарик падает с ускорением и скорость дви-

жения шарика возрастает, но по мере увеличения скорости шарика сила сопротивления F_2 будет также возрастать и, наконец, наступит такой момент, когда сила тяжести P будет уравновешена суммой F_1 и F_2 и ускорение обратится в ноль:

$$P = F_1 + F_2. \quad (7)$$

С этого момента движение шарика становится равномерным с какой-то скоростью v_0 .

Подставляя в (7) соответствующие значения для P , F_1 и F_2 , получим для коэффициента вязкости выражение

$$\eta = \frac{2}{9} (\rho_2 - \rho_1) \frac{gr^2}{v_0}. \quad (8)$$

Формула (8) справедлива, если шарик падает в жидкости, простирающейся безгранично по всем направлениям. Практически невозможно осуществить падение шарика в безграничной среде, так как жидкость всегда находится в каком-то сосуде, имеющем стенки и определенную высоту столба. Если шарик падает вдоль оси цилиндрического сосуда радиуса R с высотой жидкости h , то учет наличия стенок и высоты дает следующее выражение для η :

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{gr^2}{v_0} \frac{\rho_2 - \rho_1}{(1 + 2.4 \frac{r}{R})(1 + 1.33 \frac{r}{h})}. \quad (9)$$

Вопрос о том, какой формулой пользоваться при расчете, решается в зависимости от величины соотношения r/R и r/h . При движении шарика по оси цилиндра и при соотношении $r/R = 1/10$ различие в значениях η , полученных по формулам (8) и (9), составляет около 25%.

Порядок выполнения работы

Прибор для определения вязкости жидкости по методу Стокса представляет собой стеклянный цилиндр, запол-

ненный испытуемой жидкостью. На цилиндр наносятся две метки - резиновые кольца (рис. 2, а, б). Верхняя метка отмечает начало равномерного движения шарика. Цилиндр закрыт крышкой, имеющей отверстия в середине и около стенки, через которые бросают шарики.

При определении коэффициента внутреннего трения жидкости по методу падающего шарика рекомендуется следующий порядок выполнения работы:

1. Определите плотность жидкости ρ_1 при помощи ареометра. Для этого на рабочем месте, помимо описанного цилиндра, имеется стеклянный цилиндр меньшего размера, наполненный исследуемой жидкостью, в который опускается ареометр. Измерьте температуру жидкости.

2. Определите вес шарика на торсионных весах.

3. Микрометром измерьте диаметр шарика (не менее трех раз).

4. Определите плотность вещества, из которого сделан шарик ρ_2 . Плотность шарика можно найти, разделив его массу на объем.

Если плотности жидкости и шарика известны, то задания 1, 2, 4 выполняют по требованию преподавателя.

5. Измерьте расстояние l между метками а и б. (По заданию преподавателя положение метки б можно менять в процессе выполнения работы).

6. Пинцетом опустите шарик через отверстие в крышке в жидкость. После установления равномерного движения измеряют время t , за которое шарик проходит расстояние l между метками. В момент прохождения верхней метки запустите секундомер, а в момент прохождения нижней - выключите его. Во избежание ошибки на параллакс глаз наблюдателя должен быть установлен в плоскости этой метки (при этом мы видим прямую линию). Рассчитайте значение v_0 .

7. Измерение η проведите с 6 шариками (3 большими

и 3 маленькими). Результаты измерений занесите в таблицу 2. Произведите расчет η по формуле (8). Рассчитайте $\eta_{\text{ср}}$.

8. Для каждого значения η определите абсолютную погрешность $\Delta\eta$, как разность между $\eta_{\text{ср}}$ и данными значениями η , а затем вычислите $\Delta\eta_{\text{ср}}$. Необходимо определить также относительную погрешность в определении η .

Таблица 2

№ опыта	№ п/п	m, г	r, см	V, см ³	ρ_2 , г/см ³	l, см	t, с	$v_0=l/t$, см/с	η , Пз	$\Delta\eta$, Пз
1 шарик	1									
	2									
	3									
Среднее значение										
2 шарик	1									
	2									
	3									
Среднее значение										

Коэффициент внутреннего трения сильно зависит от температуры. Но так как количество жидкости в цилиндре довольно велико, а измерения происходят быстро, температура жидкости за время измерений практически не успевает измениться. Поэтому определение η по методу Стокса при комнатной температуре может производиться без термостатирования прибора, но в отчете следует указать, при какой температуре производились измерения.

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. - М.: Наука, 1987.
2. Архангельский М.М. Курс физики (механика). - М.: Просвещение, 1975. Гл. XIII.

3. Грабовский Р.И. Курс физики. - М.: Высшая школа, 1980. § 60.
4. Мэрион Дж.Б. Общая физика с биологическими примерами. - М.: Высшая школа, 1986. Гл. 7.

Для получения зачета необходимо

1. Продемонстрировать умение определять коэффициент вязкости жидкости по методу Стокса.
2. Представить отчет по установленной форме.
3. Уметь отвечать на вопросы типа:
 - а) Какие силы действуют на шарик, падающий в жидкости?
 - б) Почему, начиная с некоторого момента времени, шарик движется равномерно?
 - в) Объясните, почему скорость тела, падающего с большой высоты, не превышает определенного установившегося значения?
 - г) Как изменится скорость движения шарика с увеличением его диаметра?
 - д) Рассчитайте коэффициент вязкости по формуле (9). Сравните полученный результат с вашими данными. Нужно ли вводить поправочный коэффициент в формулу (8) в ваших измерениях?
 - е) От чего зависит сила сопротивления движению шарика в жидкости?
 - ж) Для каких тел и какого движения справедлива формула Стокса?
 - з) Почему скорость слоя жидкости, прилегающего к цилиндру, равна нулю?
 - и) В чем состоит характерная особенность турбулентного движения жидкости (отличающая его от ламинарного движения)?

Дополнительные вопросы для студентов факультета технологии и предпринимательства

1. Из каких компонентов складывается сила лобового сопротивления?
2. С помощью каких характеристик определяют поведение динамической системы?

Дополнительные вопросы для студентов факультетов химии, биологии, института естествознания

1. Охарактеризуйте течение крови через артерию с точки зрения течения вязкой жидкости.
2. Известно, что наиболее распространенной причиной грудной жабы является атеросклероз, повреждение артерий. Рассмотрите эту болезнь, ее последствия и способы лечения с точки зрения физики течения вязкой жидкости.
3. Как меняется вязкость жидкости с изменением температуры?

Работа № 14. **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ОТРЫВА КОЛЬЦА**

Цель работы: используя метод отрыва кольца, определить экспериментально коэффициент поверхностного натяжения исследуемых жидкостей.

Принадлежности: прибор для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкостей, штангенциркуль, набор разновесов, пинцет, термометр, набор исследуемых жидкостей.

Вопросы, знание которых обязательно для допуска к выполнению работы

1. Каково строение жидкости согласно молекулярной теории?
2. Объясните, что значит "ближний порядок".
3. Что такое поверхностный слой жидкости? Почему он обладает свойствами, отличными от свойств остальной массы жидкости?
4. Что такое поверхностное натяжение? По какому направлению действует сила поверхностного натяжения?
5. Что называется коэффициентом поверхностного натяжения жидкости? В каких единицах он выражается? (Дать два определения: силовое и энергетическое).
6. Как зависит коэффициент поверхностного натяжения жидкости от температуры? Объясните ответ.
7. Можно ли определить коэффициент поверхностного натяжения, если жидкость не смачивает кольцо?
8. В чем заключается метод отрыва кольца при определении коэффициента поверхностного натяжения?

Введение

Жидкое состояние является промежуточным между твердой и газообразной фазами. Характер теплового движения молекул в жидкостях существенно отличается от движения молекул как в газах, так и в твердых телах. В газах среднее расстояние между соседними молекулами значительно больше их диаметра. Поэтому при тепловом движении молекулы движутся хаотически. В твердых кристаллических телах молекулы расположены в правильном периодическом порядке и составляют кристаллическую решетку. Этот порядок сохраняется на далекие расстояния (миллионы молекулярных расстояний). Такой порядок называется "дальним порядком". Тепловое движение молекул в твердых телах сводится к их колебаниям около положения равновесия. В жидкостях расстояние между соседними молекулами несколько больше, чем у кристаллов, в связи с чем молекулы жидкости могут отходить от своих правильных положений, расстраивая идеальный порядок, свойственный кристаллам. Молекулы жидкости связаны силами Ван-дер-Ваальса, которые, с одной стороны, недостаточны для осуществления постоянной и прочной структуры, однако, с другой стороны, под их действием молекулы уже не могут сохранять той самостоятельности и подвижности, которые характерны для газов. Тепловое движение молекул в жидкости сводится к тому, что они большую часть времени колеблются около своих положений равновесия. С увеличением температуры возрастает амплитуда колебаний, а также частота перескоков в новое состояние равновесия. Поскольку расстояния между соседними молекулами в жидкости все-таки малы, то в жидкости сохраняется так называемый "ближний порядок", т.е. порядок в расположении ближайших соседей какой-либо молекулы. Этот порядок размывается по мере удаления от данной молекулы, иными словами, силы сцепления молекул весьма быст-

ро убывают с увеличением расстояния между молекулами. На расстоянии 10^{-7} см силы становятся столь незначительными, что ими можно пренебречь. Это предельное расстояние называется радиусом молекулярного действия.

Поверхностный слой жидкости обладает свойством сокращаться. Этим объясняется тот факт, что жидкость, свободная от действия других сил, принимает форму шара (форму с минимальной поверхностью). Особенности поверхностного слоя можно объяснить с двух позиций: 1 - энергетической и 2 - динамической.

1. Молекулы жидкости, выходя на поверхность, совершают работу против сил (со стороны остальных молекул), стремящихся вернуть молекулы обратно внутрь жидкости. Эта работа переходит в запас потенциальной энергии молекулы поверхностного слоя. Поверхностный слой обладает запасом потенциальной энергии, пропорциональной размерам поверхности. Любая система стремится к такому состоянию, при котором ее потенциальная энергия поверхностного слоя будет минимальна, т.е. принимает форму с минимальной энергией. Если над жидкостью имеются пары, то работа выхода молекулы на поверхность будет уменьшаться с ростом упругости пара (т.е. с ростом температуры). При критической температуре, когда плотности жидкости и пара неразличимы, работа выхода молекулы равна нулю: поверхностного слоя нет.

2. Если молекула занимает положение I, при котором вся сфера ее действия заполнена другими молекулами той же жидкости, то относительно молекулярных сил, действующих на нее, она находится в равновесии, так как равномерно притягивается во все стороны. Это равновесие нарушается, когда молекула находится у поверхности жидкости на глубине, меньшей радиуса молекулярного действия (например, молекула II на рис. 1). На молекулу поверхностного слоя действуют молекулы жидкости и пара, причем

со стороны пара эти силы невелики, так как плотность пара (а следовательно, концентрация молекул) меньше, чем у жидкости. Каждую силу можно разложить на две составляющие: по нормали к поверхности и вдоль последней. Сумма составляющих сил, направленных перпендикулярно поверхности, определит силу давления поверхностного слоя на жидкость; сумма касательных составляющих дает силу, действующую вдоль поверхности жидкости. Силы, действующие по касательной, называют силами поверхностного натяжения. Именно они обуславливают сокращение поверхности. Эта сила пропорциональна числу молекул, прилегающих к контуру, которое, в свою очередь, пропорционально длине контура.

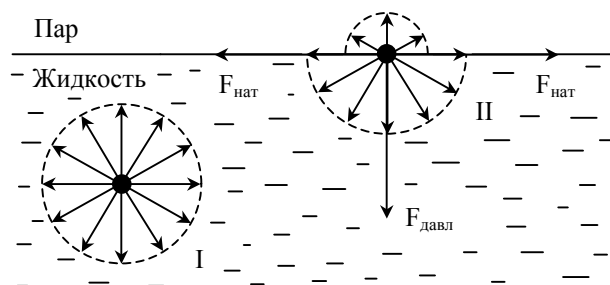


Рис. 1

Для количественной характеристики силы поверхностного натяжения жидкости вводится коэффициент поверхностного натяжения σ , который численно равен силе F , действующей на единицу длины произвольной линии l , мысленно проведенной на поверхности жидкости:

$$\sigma = \frac{F}{l}. \quad (1)$$

Коэффициент поверхностного натяжения σ зависит от рода жидкости, температуры (уменьшается с ростом последней), от степени чистоты поверхности, меняясь от малейшего загрязнения. Выражение для определения σ мож-

но представить и в несколько иной форме. Если числитель и знаменатель в (1) умножим на l , то получим

$$\sigma = \frac{F \cdot l}{l \cdot l} = \frac{A}{S}. \quad (2)$$

В этом случае коэффициент поверхностного натяжения σ численно равен работе, которую нужно затратить для увеличения поверхности жидкости на единицу площади. В системе СИ коэффициент поверхностного натяжения σ измеряется в $\text{Н} \cdot \text{м}^{-1}$ или в $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-2}$.

Существует много способов определения величины коэффициента поверхностного натяжения. В настоящей работе предлагается определить коэффициент поверхностного натяжения для воды и мыльного раствора методом отрыва кольца.

Сущность метода состоит в том, что поверхностное натяжение можно определить путем измерения силы, которую нужно приложить перпендикулярно к поверхности жидкости для отрыва кольца от этой поверхности. Поскольку отрываемое кольцо смачивается жидкостью, то вместе с ним поднимается количество жидкости, т.е. будет увеличиваться свободная поверхность жидкости. Вследствие стремления этой жидкости сократиться возникает сила

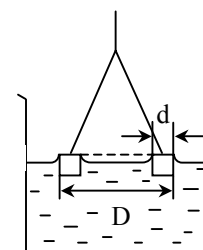


Рис. 1

поверхностного натяжения. Если сила, действующая на тело, равна по величине силе поверхностного натяжения, то тело отрывается от жидкости.

Рассмотрим кольцо с наружным диаметром D и толщиной d , касающееся поверхности жидкости (рис. 2). При поднятии кольца над поверхностью жидкости между кольцом и поверхностью воды образуется пленка. Внешняя поверхность этой пленки тянет кольцо вниз с силой $\sigma \cdot \pi \cdot D$, внутренняя поверхность также тянет вниз с силой $\sigma \cdot \pi \cdot (D - 2d)$.

Результирующая сила, удерживающая кольцо, равна:

$$\sigma \cdot \pi \cdot D + \sigma \cdot \pi \cdot (D - 2d) = 2\sigma \cdot \pi \cdot (D - d) \quad (3)$$

В момент отрыва кольца

$$F = 2\sigma \cdot \pi \cdot (D - d),$$

откуда

$$\sigma = \frac{F}{2\pi \cdot (D - d)}. \quad (4)$$

Порядок выполнения работы

Поскольку диаметр и толщина кольца могут быть измерены штангенциркулем, то определение коэффициента поверхностного натяжения сводится к определению силы отрыва F . Для измерения этой силы служит следующая установка (рис. 3). Против зеркальной шкалы N на специальной пружине B подвешен указатель C , чашечка A и тонкостенное кольцо K , которое хорошо смачивается данной жидкостью. Кольцо должно висеть строго горизонтально. Кольцо приводится в соприкосновение с поверхностью жидкости в сосуде путем передвижения последнего вместе со столиком P . При этом жидкость может подниматься по стенкам кольца, а само кольцо несколько втянется внутрь жидкости. Этот эффект можно заметить по небольшому растяжению пружины в момент соприкосновения кольца с поверхностью воды.

Начнем теперь медленно опускать платформу с сосудом. По мере опускания кольца пружина будет постоянно растягиваться, пока, наконец, кольцо не оторвется от поверхности воды. В этот момент сила упругости пружины $F_{\text{пр}}$ сравняется с силой поверхностного натяжения жидкости $2\sigma \cdot \pi \cdot (D - d)$. При растяжении пружины глаз всё время необходимо удерживать на уровне указателя C и отмечать деление шкалы N , с которым совпадает указатель в момент отрыва кольца. Затем, осушив кольцо, кладут на чашечку A

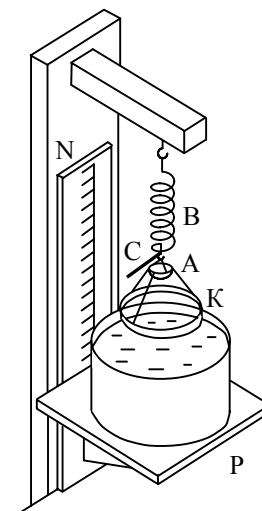


Рис. 2

такой груз, чтобы указатель занял положение, соответствующее среднему отсчету по шкале в момент отрыва кольца. Величина $P = mg$ измеряет упругую силу $F_{\text{пр}}$ пружины, нужную для отрыва кольца от жидкости. Для определения коэффициента поверхностного натяжения σ рекомендуется следующий порядок работы:

1. Измерить штангенциркулем внешний диаметр D и толщину стенок кольца d .
2. Опустить кольцо в сосуд с испытуемой жидкостью.
3. Платформу с сосудом поднимают до тех пор, пока кольцо не коснется жидкости.
2. Медленно и плавно опуская вниз платформу с сосудом, отметить положение указателя C на зеркальной шкале N при отрыве кольца.
4. Убрать сосуд с жидкостью. Загрузить в чашку такой груз, чтобы указатель C показывал столько же делений на шкале, как и в момент отрыва кольца.

Опыт проводят не менее 5 раз. Затем необходимо вычислить коэффициент поверхностного натяжения σ по формуле (4) и занести результат в таблицу.

Подсчитать относительную и абсолютную погрешности в определении коэффициента поверхностного натяжения.

Таблица

№ опыта	D , м	ΔD , м	d , м	Δd , м	C , дел.	ΔC , дел.	P , Н	ΔP , Н	σ , Н/м	$\Delta \sigma$, Н/м
1										

³ Исследуемую жидкость получить у лаборанта.

2										
3										
4										
5										
Среднее значение										

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. I. - М.: Наука, 1969. § 142, 143, 145.
2. Телеснин В.В. Молекулярная физика. - М.: Высшая школа, 1965. § 92, 44, 95, 97.
3. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Т. I. - М.: Наука, 1967. § 248-250, 252, 253.
4. Мэрион Дж.Б. Общая физика с биологическими примерами. - М.: Высшая школа, 1986. Гл. 7.

Для получения зачета необходимо

1. Продемонстрировать умение определять коэффициент поверхностного натяжения методом отрыва кольца.
2. Представить отчет по установленной форме.
3. Уметь отвечать на вопросы типа:
 - а) Почему трудно снять с руки мокрую перчатку?
 - б) Почему при отсутствии внешних сил капля принимает форму шара?
 - в) Почему маленькие капли ртути, разлитые на столе, имеют форму, близкую к шарообразной, а большие - растекаются на столе?
 - г) На одном конце соломинки выдули мыльный пузырь и подвесили другой ее конец к пламени горячей свечки. Почему пламя свечи при этом отклоняется в сторону?

д) Какую форму примет некоторая масса жидкости в условиях невесомости?

е) Объясните растекание жидкости по твердому телу с точки зрения действия сил поверхностного натяжения. Что такое краевой угол?

ж) Нарисуйте, как направлена сила поверхностного натяжения в момент отрыва кольца?

з) Почему капли жира, плавающего на поверхности горячего супа, имеют при наблюдении сверху вид кругов? Если краем ложки образовать шейку между двумя соседними каплями, то они сольются в одну большую каплю. Почему?

и) Поверхностное натяжение мыльной воды в 2 раза меньше, чем у воды чистой. Почему же мыльная вода образует такие прочные пузыри и пленки, какие из чистой воды получить нельзя?

Дополнительные вопросы для студентов факультета технологии и предпринимательства

1. Почему алюминий нельзя паять обыкновенным (оловянным) припоем?
2. В результате аварии танкера нефтевоза на поверхности разбушевавшегося моря расплылось некоторое количество нефти. Почему в этом месте водная стихия на некоторое время "успокоилась"?
3. Как объяснить резание стекла алмазом?
4. Почему струйка керосина, вытекающая из крана бензобака, постепенно делается тоньше и затем распадается на капли?

Дополнительные вопросы для студентов факультетов химии, биологии, института естествознания

1. Раствор жира в бензине имеет большой коэффици-

ент поверхностного натяжения, чем чистый бензин. Что следует смачивать бензином при удалении пятна: центр или края жирного пятна на ткани?

2. Можно ли определить коэффициент поверхностного натяжения методом отрыва кольца, если жидкость не смачивает кольцо? Сравните физические свойства этих жидкостей.

3. Известно, что спирт более летучая жидкость, чем вода.

4. Как перемещаются по воде мелкие насекомые (например, водомерки) и паукообразные (береговые пауки)?

Дополнительные вопросы к работе

1. Какую работу надо совершить против сил поверхностного натяжения, чтобы увеличить площадь поверхности мыльного пузыря на 20 см^3 ?

2. На сколько увеличится энергия поверхностного слоя мыльной пленки при увеличении площади ее поверхности на 40 см^2 ?

3. Для получения свинцовой дроби расплавленный свинец льют каплями с некоторой высоты в бак с водой. Дробинки, полученные этим способом, приобретают форму шариков. Почему?

4. Почему свободная поверхность любой жидкости имеет зеркальный вид?

5. Почему волоски кисти, опущенной маляром в воду, расходятся - а вынутые из воды слипаются?

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ
Компьютерная верстка В.И. Сельдяев

Лицензия №021216 от 29.04.97 г.

Подписано в печать 03.08.2000 г. Формат $60 \times 84^{1/16}$.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Объем: 4,25 усл. печ. л.; 4,25 уч.-изд. л.

Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство РГПУ им. А.И. Герцена. 191186, С.-Петербург, наб.р. Мойки, 48

РТП РГПУ им. А.И. Герцена. 191186, С.-Петербург, наб.р. Мойки, 48