

М. В. Семенов, Ю. В. Старокуров, А. А. Якута

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ЛЕКЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Под редакцией проф. А. М. Салецкого

*Допущено УМО по классическому университетскому образованию РФ
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки 011200 – Физика
и по специальности 011501– Астрономия*

Москва
Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова
2013

УДК 53.07 (072.8)

ББК 22.3

Семенов Михаил Владимирович, Старокуров Юрий Владимирович, Якута Алексей Александрович. **Молекулярная физика. Лекционный эксперимент:** Под ред. А. М. Салецкого / Учебное пособие. М.: Физический факультет МГУ, 2013. – 160 с.

ISBN 978-5-8279-0116-7

В пособии содержатся описания более 100 лекционных экспериментов, которые могут демонстрироваться при чтении лекций по разделу «Молекулярная физика» курса общей физики.

Пособие разбито по главам в соответствии с программой раздела «Молекулярная физика». В начале каждой главы имеется краткое введение со ссылками на основные учебники по этому разделу курса общей физики. Описания лекционных экспериментов предваряются методическими указаниями и техническими пояснениями для лекторов и лекционных ассистентов, позволяющими формировать наборы демонстраций, которые наиболее соответствуют темам лекций. В пособии подробно описаны как классические, так и оригинальные лекционные демонстрации; практически все описания снабжены фотографиями или рисунками.

Учебное пособие предназначено лекторам, читающим курс общей физики для студентов физических и технических специальностей университетов, лекционным ассистентам, а также школьным учителям. Пособие также может быть полезно студентам, аспирантам и научно-педагогическим работникам, интересующимся техникой и методикой демонстрационного физического эксперимента.

Рецензенты: д.ф.-м.н. профессор В.А. Макаров,
д.ф.-м.н. профессор Г.С. Плотников.

Учебное издание

Подписано в печать 9.11.2013 г.

Формат 60×90.16 Объем 10 печ. л. Тираж 100 экз.

Заказ №

Отпечатано в Типографии МГУ им. М.В. Ломоносова
Москва, Ленинские горы, ул. Академика Хохлова, д. 11

ISBN 978-5-8279-0116-7

© Физический факультет МГУ
имени М.В. Ломоносова, 2013.
© Коллектив авторов, 2013.

К читателям серии пособий «УНИВЕРСИТЕТСКИЙ КУРС ОБЩЕЙ ФИЗИКИ»

На кафедре общей физики физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова создан и готовится к изданию «Университетский курс общей физики», предназначенный для студентов физических специальностей вузов.

Курс охватывает четыре раздела: «Механика», «Молекулярная физика», «Электромагнетизм» и «Оптика». Отличительной особенностью данного курса является то, что в нем в методическом отношении осуществлено единство основных форм обучения физике: лекции, лабораторные работы и семинары. В системе университетского образования теоретический материал излагается в основном в лекционных курсах, а умение решать задачи отрабатывается на семинарских занятиях. Развитие навыков эксперимента и анализа его результатов происходит в процессе занятий в общем физическом практикуме. В связи с этим, каждый раздел курса состоит из четырех пособий: «Лекции», «Лекционный эксперимент», «Лабораторный практикум» и «Методика решения задач».

Каждая глава пособия «Лекции» содержит материал базового уровня, соответствующего программе курса, и отражает современные тенденции и технологии физического образования. Лекции по каждой теме сопровождаются демонстрацией основных физических экспериментов, описание которых представлено в пособии «Лекционный эксперимент».

Пособием, позволяющим развивать умение решать физические задачи, является «Методика решения задач», которое составлено с таким расчетом, чтобы им можно было пользоваться для самостоятельной работы. Весь материал разбит на главы. Разбор задач всех глав проводится по единой схеме, причем каждую главу можно прорабатывать независимо от других.

Неотъемлемой частью курса общей физики служит лабораторный практикум. Материалы пособия «Лабораторный практикум» достаточны для самостоятельной подготовки к выполнению работ. В связи с этим в пособии имеется как общее теоретическое введение, так и более подробное изложение теории к каждой лабораторной работе. Кроме того, в каждой работе сформулированы цель и идея эксперимента, дано описание установки и подробное изложение последовательности проведения эксперимента и обработки результатов.

Все пожелания и замечания по пособиям курса будут с благодарностью приняты и рассмотрены на кафедре общей физики физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	7
 Глава 1. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ	
1.1. Биномиальное распределение.....	8
1.1.1. Модель с $N = 2$ рядами рассеивающих центров (9). 1.1.2. Модель с $N = 3$ рядами рассеивающих центров (10). 1.1.3. Модель с $N = 4$ рядами рассеивающих центров (11).	
1.2. Нормальное распределение. Доска Гальтона.....	11
1.3. Модель идеального газа. Опыт А. А. Эйхенвальда и Н. В. Разживина.....	12
1.3.1. Моделирование хаотического движения молекул газа. Распределение Максвелла. Понятия температуры и давления газа (15). 1.3.2. Понятие времени релаксации. Качественная оценка роли флуктуаций (16). 1.3.3. Конденсация газа на холодной стенке (случай неравенства температур стенок сосуда) (17). 1.3.4. Моделирование броуновского движения (18). 1.3.5. Моделирование движения молекул двухатомного газа (18).	
1.4. Распределение молекул в поле силы тяжести (модель С. И. Усагина).....	19
1.5. Изменение давления газа с высотой.....	20
1.5.1. Опыт с пламенами (20). 1.5.2. Опыт с шаром, наполненным легким газом (21). 1.5.3. Подъем бутылки с воздухом на высоту аудиторного балкона (22).	
1.6. Измерение температуры.....	23
1.6.1. Модель газового термометра (23). 1.6.2. Ртутные термометры (влияние теплоемкости термометра на результат измерения) (25).	
1.7. Измерение давления.....	25
1.7.1. U-образный манометр (25). 1.7.2. Сравнение чувствительности U-образных манометров (26). 1.7.3. Манометр Бурдона (28). 1.7.4. Барометр-анероид (28). 1.7.5. Опыт Торричелли (29).	
 Глава 2. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ	
2.1. Вязкость газа.....	31
2.2. Зависимость вязкости газа от температуры.....	32
2.3. Независимость вязкости газа от давления.....	33
2.4. Сравнение теплопроводностей воздуха и метана.....	34
2.5. Независимость теплопроводности газа от давления.....	37
2.6. Модель диффузии.....	38
2.7. Диффузия паров брома.....	38
2.8. Эффузия газа через пористую перегородку.....	39
2.8.1. Изотермическая эффузия (39). 2.8.2. Термоэффузия. Эффект Кнудсена (42).	
2.9. Радиометрические силы в разреженных газах. Радиометр Крукса.....	44

Глава 3. ТЕПЛОТА И РАБОТА. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

3.1. Превращение работы в теплоту	45
3.1.1. Опыт Тиндаля (45). 3.1.2. Ковка свинца на наковальне (45). 3.1.3. Нагревание газа при адиабатическом сжатии («воздушное огниво») (47).	
3.2. Превращение теплоты в работу (водяная «пушка»)	48
3.3. Измерение показателя адиабаты у газов методом Рухардта	49
3.4. Вихревая трубка Ранке и Хильша	52
3.5. Основы работы тепловых двигателей	53
3.5.1. Опыт В. К. Аркадьева (53). 3.5.2. Кипение хлороформа под водой (54).	
3.6. Модели тепловых двигателей	55
3.6.1. Паровая машина (55). 3.6.2. Двигатель Стирлинга (57). 3.6.3. Колесо с резиновыми спицами (59). 3.6.4. Колесо с ферромагнитными спицами (60). 3.6.5. «Термомобиль» (62). 3.6.6. Китайский «гусь» («пьющая утка») (62). 3.6.7. Опыт Дарлинга (64). 3.6.8. Модифицированный опыт Дарлинга (65).	
3.7. Элементы синергетики	67
3.7.1. Конвективные потоки в жидкости. Ячейки Бенара (67). 3.7.2. Реакция Белоусова–Жаботинского (69).	

Глава 4. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ЖИДКОСТИ

4.1. Сжижение углекислоты. Опыт Кальете	71
4.2. Сжижение метана в воздушном шарике	72
4.3. Нагревание реального газа при постоянном объеме (взрыв бутылки с жидким азотом)	73
4.4. Критическое состояние эфира	76
4.5. Эффект Джоуля–Томсона	77
4.5.1. Дифференциальный эффект Джоуля–Томсона (77). 4.5.2. Интегральный эффект Джоуля–Томсона и ожижение азота (78).	
4.6. Несжимаемость жидкости	80
4.6.1. Простреливание сосуда с водой (80). 4.6.2. Искра в жидкости (81). 4.6.3. Пьезометр Вайнгольда (82).	

Глава 5. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

5.1. Испарение, кипение, конденсация	84
5.1.1. Теплота испарения (84). 5.1.2. Кипение воды под колоколом насоса (85). 5.1.3. Кипение при охлаждении (86). 5.1.4. Пленочное и пузырьковое кипение жидкого азота (87). 5.1.5. Кипение перегретой воды (89). 5.1.6. Образование тумана при адиабатическом расширении воздуха (91).	
5.2. Плавление и кристаллизация	92
5.2.1. Ртутный молоток (92). 5.2.2. Замерзание кипящей воды (93). 5.2.3. Кристаллизация переохлажденного гипосульфита (95). 5.2.3.1. Теплота кристаллизации (95). 5.2.3.2. Рост кристаллов гипосульфита (97).	
5.3. Зависимость температуры плавления парафина от давления	98
5.4. Сублимация и десублимация	99
5.4.1. Испарение твердой углекислоты (99). 5.4.2. Возгонка нашатыря (100).	

Глава 6. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

6.1. Опыт Плато	101
6.2. Изменение поверхностного натяжения.....	103
6.2.1. Уменьшение поверхностного натяжения воды (103). 6.2.2. Искусственная «амёба» (104). 6.2.3. Движение кристаллов камфары по поверхности воды (105). 6.2.4. «Живые» капли ртути (106).	
6.3. Мыльные пузыри и плёнки	107
6.3.1. Работа мыльной плёнки (107). 6.3.2. Плёнки на каркасах (108). 6.3.3. Зависимость давления в мыльном пузыре от его радиуса (113).	
6.4. Капиллярные явления.....	114
6.4.1. Подъем жидкости в капиллярных трубках (114). 6.4.2. Подъем жидкости в клине (116). 6.4.3. Капиллярные силы (притяжение стеклянных пластинок) (117). 6.4.4. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры (119).	
6.5. Смачивание и несмачивание.....	120
6.5.1. Всплывание поплавка (120). 6.5.2. Вода в «решете» (парафинированное сито) (121). 6.5.3. Капли керосина и ртути на стекле (124). 6.5.4. Плавание парафинированного диска с грузом на поверхности воды (124).	

Глава 7. РАСТВОРЫ

7.1. Взаимное растворение жидкостей (уменьшение объема при смешивании воды и ацетона).....	127
7.2. Диффузия раствора двуххромовокислого калия в воде	129
7.3. Теплота растворения	131
7.4. Осмотическое давление.....	132
7.4.1. Полупроницаемая мембрана (132). 7.4.2. «Искусственные клетки» (133).	

Глава 8. СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

8.1. Модель теплового движения кристаллической решетки	134
8.2. Кристаллы	134
8.2.1. Модели решеток Браве (134). 8.2.2. Модели кристаллических решеток графита и алмаза (136).	
8.3. Полиморфизм. Опыт Брэгга.....	140
8.4. Тепловое расширение.....	143
8.4.1. Шар и отверстие (143). 8.4.2. Тепловое расширение стержней из разных металлов (143). 8.4.3. Расширение металла и сжатие резины при нагревании (145).	
8.5. Увеличение твердости при охлаждении	146
8.5.1. Резиновый и свинцовый колокольчики (146). 8.5.2. Хрупкость резины (147).	
8.6. Сравнение температуропроводности различных металлов и сплавов	148
8.7. Динамика распространения теплоты в стержне.....	150
8.8. Сравнение теплоемкости различных металлов и сплавов.....	153
8.9. Межмолекулярные силы. Плитки Иогансона	154

Литература	156
-------------------------	------------

Список видеодемонстраций по курсу «Молекулярная физика»	158
--	------------

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое пособие «Молекулярная физика. Лекционный эксперимент» входит в состав «Университетского курса общей физики». Предыдущее пособие «Лекционные демонстрации по физике» под редакцией проф. В.И. Ивероновой вышло в свет в 1972 году.

В пособии описаны опыты, которые демонстрируются при чтении лекций по разделу «Молекулярная физика» курса общей физики студентам различных факультетов МГУ имени М.В.Ломоносова. Большая часть описанных экспериментов разработана в Кабинете физических демонстраций (КФД), и многие из них были описаны в ранее изданных пособиях по лекционным демонстрациям [1 – 4]. Для полноты охвата материала описания этих классических экспериментов приведены с небольшими изменениями и в данном пособии. В тексте пособия имеется также ряд ссылок на авторские свидетельства на изобретения в области лекционных экспериментов по молекулярной физике, полученные сотрудниками КФД физического факультета МГУ [5 – 8]. Описания практически всех демонстрационных экспериментов снабжены фотографиями или рисунками.

В начале каждой главы пособия имеется краткое введение со ссылками на основные учебники по разделу «Молекулярная физика» УКОФ [10 – 15]. Описания лекционных экспериментов предваряются методическими указаниями для лекторов и лекционных ассистентов.

В Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова осуществлены видеозаписи лекционных экспериментов [16], которые могут использоваться на лекциях в качестве иллюстративного материала, зачастую заменяющего реальные демонстрационные опыты. Со всеми списками видеозаписей можно ознакомиться на web-сайте <http://genphys.phys.msu.ru/video>. Список видеодемонстраций по курсу молекулярной физики приведен в конце данного пособия.

Авторы выражают благодарность заведующему кафедрой общей физики МГУ профессору А.М. Салецкому и ряду преподавателей кафедры за внимательное прочтение и редактирование рукописи данной работы, сотруднику КФД Т.Ш. Мусаеву за изготовление экспериментальных установок и видеосъемку демонстрационных экспериментов, а также старшему преподавателю МЛЦ МГУ Е.А. Вишняковой за подготовку рисунков.

Глава 1

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

Предметом молекулярной физики является изучение молекулярной формы движения, то есть движения больших совокупностей молекул [10 – 15]. Законы их поведения исследуются статистическими методами, и поэтому лекционные эксперименты, описанные в данной главе, иллюстрируют основные понятия статистической физики на примере модели идеального газа, а также способы измерения параметров его состояния – температуры и давления.

1.1. Биномиальное распределение.

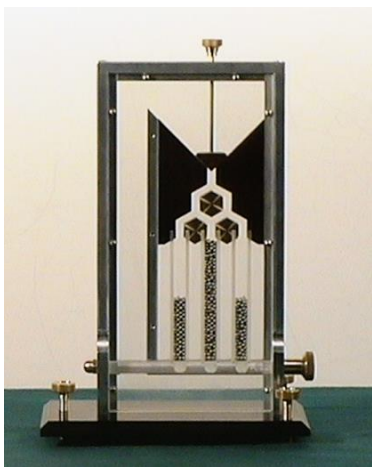


Рис. 1.1. Биномиальное распределение. Модель с $N = 2$ рядами рассеивающих центров.

Демонстрируются модели биномиального распределения¹, играющего важную роль в статистической физике [5]. Модели устроены следующим образом: стальные шарики диаметром 3 мм из верхнего большого сборника могут просыпаться по ряду вертикальных каналов шириной 6 мм в нижние ячейки-приемники, снабженные запорным устройством в виде поворотного цилиндра с отверстиями напротив ячеек, в которые попадают шарики (см. рисунок 1.1). Перед проведением опыта шарики из нижнего большого сборника через боковое отверстие в цилиндре пересыпаются в верхний сборник путем

переворота установки «вверх ногами» и ее встряхивания. После этого установка помещается на стол в строго вертикальном положении, которое устанавливается при помощи регулировочных винтов. Затем треугольный толкатель, запирающий верхний сборник, приподнимают и дают шарикам возможность сыпаться вниз; если шарики застревают в сборнике, их пропихивают толкателем. После высыпания

¹ Демонстрация предложена М. В. Семеновым и изготовлена под его руководством.

всех шариков и наблюдения их распределения по ячейкам запорный цилиндр поворачивают за ручку на 90° вокруг его оси, и шарики высыпаются в нижний сборник, откуда после еще одного поворота цилиндра на 90° их можно снова пересыпать наверх и повторить опыт.

Во время проведения опыта на верхнем ребре каждой шестигранной призмы, расположенной напротив вышележащего канала, происходит рассеяние шариков вправо или влево с вероятностями p и q . На следующем ряду призм шарики, собранные после рассеяния на верхнем ребре первой призмы в каналы, расположенные по ее бокам, снова подвергаются рассеянию с теми же вероятностями. После N рядов рассеивающих призм шарики собираются в нижние ячейки и заполняют их до определенных уровней, которые характеризуют вероятности попадания шариков в соответствующие ячейки. Эти вероятности описываются биномиальным распределением: $P(N, m) = C_N^m p^m q^{N-m}$, где m – число отклонений шарика вправо, $N - m$ – влево при прохождении N рядов призм, C_N^m – число сочетаний из N по m .

Эта модель позволяет проиллюстрировать основные понятия статистической теории. Например, примером микросостояния системы является конкретный путь шарика между призмами, и в данном случае при $p = q = 1/2$ все такие пути равновероятны. Попадание шарика в конкретную ячейку является примером макросостояния, и оно зависит от числа путей, которые приводят туда шарик.

1.1.1. Модель с $N = 2$ рядами рассеивающих центров.

При числе рассеивающих центров $N = 2$ в крайние ячейки идет один, а в среднюю – два пути. Это число путей является примером термодинамической вероятности. Полное число микросостояний, то есть путей в разные ячейки, в данном случае равно 4, и распределение вероятностей имеет вид: $1/4$; $2/4$; $1/4$. После проведения опыта видно, что уровни заполнения ячеек относятся примерно как $1 : 2 : 1$ (рис. 1.1), что подтверждает справедливость применения биномиального распределения в данном случае. Число используемых в опыте шариков – порядка 1000, так что при последовательных повторениях опыта числа и уровни заполнения ячеек шариками не остаются постоянными, а наблюдаются флуктуации, достигающие примерно $1/\sqrt{1000} \approx 3\%$ от величин этих уровней. При многократном повторении опыта можно проиллюстрировать и рас-

пределение Пуассона², согласно которому изменяются от опыта к опыту числа заполнения шариками любой конкретной ячейки.

1.1.2. Модель с $N = 3$ рядами рассеивающих центров.

Модель с $N = 3$ рядами рассеивающих центров устроена аналогичным модели с $N = 2$ образом, только в ней имеются не 2, а 3 ряда рассеивающих призм. Для нее также непосредственно подсчитываются термодинамические вероятности, то есть числа путей, ведущих шарики в разные ячейки. Эти числа равны 1, 3, 3 и 1, а полное число возможных равновероятных путей шарика в установке с $N = 3$ равно 8, так что распределение вероятностей имеет вид: $1/8$; $3/8$; $3/8$; $1/8$. После проведения опыта видно, что уровни заполнения ячеек сборника относятся примерно как $1 : 3 : 3 : 1$ (рис. 1.2), и биномиальное распределение годится и в данном случае. При повторении опыта также можно наблюдать флуктуации чисел и, следовательно, уровней заполнения соответствующих ячеек, составляющие несколько процентов, в соответствии с числом шариков (~ 1000) в установке.

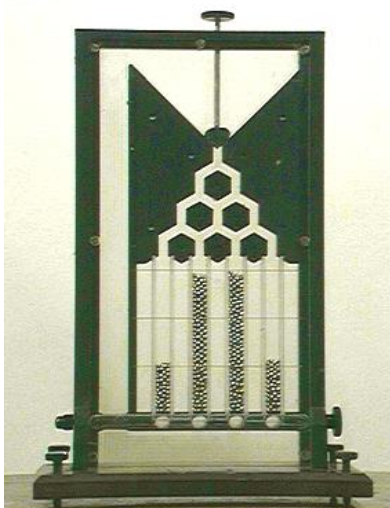


Рис. 1.2. Биномиальное распределение. Модель с $N = 3$ рядами рассеивающих центров.

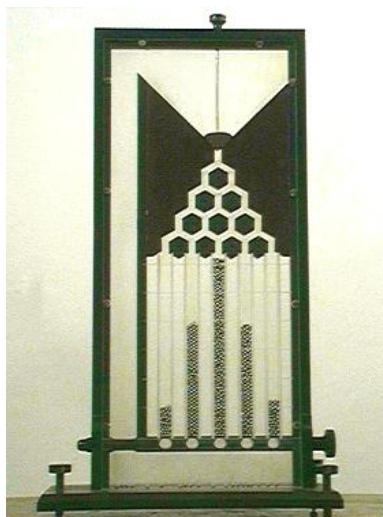


Рис. 1.3. Биномиальное распределение. Модель с $N = 4$ рядами рассеивающих центров.

² С. Д. Пуассон (1781 – 1840) – знаменитый французский математик, механик и физик.

1.1.3. Модель с $N = 4$ рядами рассеивающих центров.

В модели с $N = 4$ рядами рассеивающих призм, устроенной аналогичным моделям с $N = 2$ и $N = 3$ образом, имеются уже не 2 или 3, а 4 ряда рассеивающих призм. Подсчет числа путей, ведущих в разные ячейки при $N = 4$, дает 1, 4, 6, 4, 1, а полное число путей в разные ячейки равно 16. После проведения эксперимента видно, что с точностью до флуктуаций уровни заполнения ячеек относятся, как 1 : 4 : 6 : 4 : 1 (рис. 1.3), то есть подтверждается биномиальное распределение для $N = 4$ и $p = q = 1/2$: $P(4, m) = 1/16$; $4/16$; $6/16$; $4/16$; $1/16$ при $m = 0, 1, 2, 3, 4$. При повторении опытов флуктуации лучше наблюдать в крайних ячейках, где средние числа и уровни заполнения минимальны.

Устанавливая при помощи регулировочных винтов на основаниях все описанные выше приборы с наклоном в плоскости рассеяния шариков, можно наблюдать «перекошенные» биномиальные распределения – при p и q , не равных друг другу. Данные опыты следует проводить после того, как продемонстрированы эксперименты на установках, находящихся в строго вертикальном положении, когда $p = q = 1/2$.

1.2. Нормальное распределение. Доска Гальтона³.

С ростом числа N рядов рассеивающих центров биномиальное распределение, согласно центральной предельной теореме Ляпунова⁴, превращается в нормальное распределение (распределение Гаусса⁵). Реально биномиальное распределение становится близким к нормальному уже при десяти рядах рассеивающих цен-

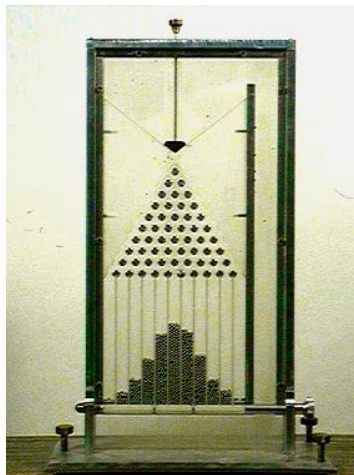


Рис. 1.4. Доска Гальтона.

³ Изобретена английским географом, психологом и антропологом Ф. Гальтоном (1822 – 1911); первый экземпляр прибора изготовлен в 1873 г.

⁴ А. М. Ляпунов (1857 – 1918) – русский математик и механик, академик Петербургской Академии наук, член-корреспондент и член ряда иностранных академий наук и научных обществ.

⁵ И. К. Ф. Гаусс (1777 – 1855) – немецкий математик, механик, физик и астроном, иностранный член Шведской и Российской Академий наук, английского Королевского общества.

тров ($N = 10$). При этом рассеивающие центры уже не обязательно выполнять в виде шестигранных призм; их можно сделать в виде цилиндров – это не будет влиять на результат. Прибор, устроенный таким образом, носит название доски Гальтона (рис. 1.4). Конструктивные особенности этой установки и способ демонстрации опытов аналогичны установкам, описанным выше и моделирующим биномиальные распределения для $N = 2, 3$ и 4 рядам рассеивающих призм.

Во время проведения эксперимента следует указать, что центральные ячейки заполняются быстрее, поскольку в них ведет большее число путей шариков между цилиндрами, чем в крайние ячейки, и в конце получается куполообразное распределение уровней заполнения ячеек – гистограмма, характерная для нормального распределения.

1.3. Модель идеального газа. Опыт А. А. Эйхенвальда и Н. В. Разживина.

Явления в газах определяются статистическими закономерностями и зависят от параметров состояния, которые являются макроскопическими и поддаются измерению. Для демонстрации процессов в газах необходимо подобрать модель газа и способы регулировки параметров этих процессов. Наиболее подходящей для такой демонстрации является механическая модель – набор беспорядочно движущихся упругих шариков, моделирующих молекулы. Поскольку процессы в газах подчиняются статистическим закономерностям, то число шариков-молекул должно быть достаточно велико (порядка сотни и более). Роль сосуда для газа в этой демонстрации может играть коробка с вибрирующими стенками, причем интенсивность вибрации моделирует, очевидно, температуру стенок сосуда. Помещая в коробку шарики с разными массами и различные объекты, можно, изменяя напряжение на вибраторах, моделировать различные явления в газах, поясняя основные положения молекулярно-кинетической теории.

Используемый для показа данной демонстрации прибор является модернизацией установки, предложенной А. А. Эйхенвальдом и Н. В. Разживиным⁶, при сохранении основного принципа

⁶ А. А. Эйхенвальд (1863 – 1944) – русский и советский физик, преподавал в Московском университете. Н. В. Разживин – в 20-е годы прошлого века работал в Физическом институте 2-го Государственного университета в Москве совместно с А. К. Тимирязевым.

ее действия⁷. Внешний вид прибора представлен на рисунке 1.5. Площадь демонстрационного поля увеличена до $20 \times 20 \text{ см}^2$, а сама установка приспособлена для работы совместно с кодоскопом, что позволяет заметно увеличить размеры изображения поля на экране (до $\sim 2 \times 2 \text{ м}$). Каждая из четырех сторон поля состоит из 2 вибрирующих пластин размерами $100 \times 40 \text{ мм}^2$, в которых просверлены мелкие отверстия (диаметром меньше размеров шариков, используемых в опыте) для уменьшения нежелательных потоков воздуха, возникающих при работе установки. Пластины изготовлены из луженой жести толщиной 0,3 мм и крепятся таким образом, что их можно перемещать вперед и назад по отношению к демонстрационному полю. Магнитная система каждого вибратора состоит из П-образной половины ферритового сердечника телевизионного строчного трансформатора (диаметр сердечника $\sim 2 \text{ см}$) с обмоткой из ~ 1000 витков провода ПЭВ-0,3. Питание вибраторов осуществляется через ЛАТР от переменного напряжения ($\sim 12 \text{ В}$, 50 Гц). Сердечник располагается вблизи вертикальной части вибрирующей пластины, причем его положение также регулируется. Каждые 2 вибратора, образующие одну сторону демонстрационного поля, смонтированы на отдельной подставке, которая может перемещаться вперед-назад по отношению к полю. Зазоры между вибрирующими пластинами сделаны минимальными ($0,5 \div 1 \text{ мм}$), сверху прибор закрывается прозрачной крышкой из оргстекла, чтобы исключить выброс частиц за пределы демонстрационного поля. Все 8 вибраторов могут включаться независимо, а напряжение, подаваемое на обмотку каждого вибратора, регулируется отдельным потенциометром. Прибор опирается на три регулировочных винта, что позволяет устанавливать демонстрационное поле горизонтально. Увеличение поля привело к тому, что возросли потери энергии на трение при соударении шариков-«молекул». Поэтому в качестве



Рис. 1.5. Прибор для демонстрации модели идеального газа.

⁷ Установка модернизирована Г. А. Мироновой и М. В. Семеновым.

моделей молекул необходимо использовать достаточно упругие шарики. После ряда экспериментов было выяснено, что хорошие результаты получаются со стальными шариками от подшипников диаметром 3 мм. Прозрачное дно демонстрационного поля сделано выпуклым (в центре подъем ~ 5 мм), чтобы избежать самопроизвольного скопления шариков в центре поля за счет трения и некоторого воздействия потоков воздуха, создаваемых вибрирующими пластинами. Наличие ряда регулировок значительно расширяет возможности установки и улучшает ее эксплуатационные характеристики. Поэтому демонстрация позволяет моделировать ряд явлений, которые на старой установке показать было трудно или невозможно.

При подготовке данной демонстрации к показу необходимо установить в аудитории кодоскоп и экран (вместо экрана можно использовать белую стену аудитории), подключить кодоскоп к сети и поставить на него прибор. Затем следует засыпать в прибор шарики, подготовить ЛАТР и убедиться, что ручка регулировки его выходного напряжения установлена на нулевую отметку. При помощи проводов соединить выходные клеммы ЛАТРа с клеммами, расположенными на боковой стенке прибора. Включить кодоскоп и получить на экране резкое изображение демонстрационного поля прибора с находящимися в нем шариками. Включить ЛАТР в сеть ~ 220 В, вывести его выходное напряжение на 12 В и включить прибор, переведя тумблеры в положение «Вкл» (не следует держать вибраторы прибора во включенном состоянии более 5 минут – это может привести к перегреву обмоток). Убедиться, что пластины всех вибраторов колеблются с примерно одинаковой амплитудой. Если это не так, то путем их перемещения выровнять амплитуды колебаний, используя соответствующие винты крепления пластин. В случае если точная регулировка выходного напряжения ручкой ЛАТР затруднена, рекомендуется включить между ним и прибором соответствующий понижающий трансформатор. При подготовке демонстрации нужно иметь в виду, что стальные шарики при взаимодействии с вибраторами могут намагничиваться, поэтому перед демонстрацией шарики желательно размагничивать. Нельзя собирать шарики из прибора при помощи магнита.

При помощи данного прибора в зависимости от темы лекции можно показывать следующие демонстрации.

1.3.1. Моделирование хаотического движения молекул газа. Распределение Максвелла⁸. Понятия температуры и давления газа.

Движение шариков может служить достаточно наглядной механической моделью хаотического движения молекул газа. Хаотичность движения обеспечивается не только нелобовыми соударениями самих шариков, но и беспорядочными столкновениями с вибрирующими стенками рабочего поля прибора. Для проведения этой демонстрации нужно засыпать в прибор около 100 маленьких шариков и включить все вибраторы, подав на них максимальное напряжение (около 12 В). При этом хорошо видно, что движение шариков является полностью беспорядочным (рис. 1.6).

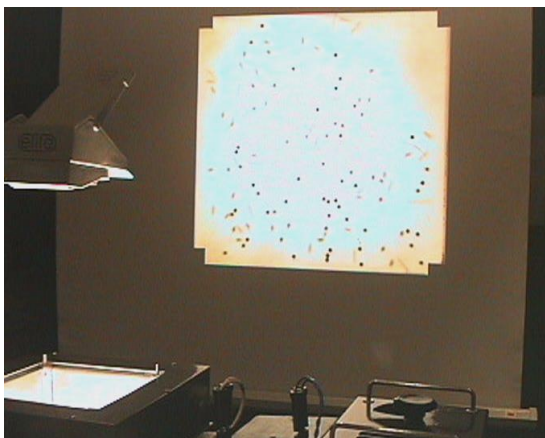


Рис. 1.6. Моделирование хаотического движения молекул газа.

В то же время заметно, что при одинаковой массе шариков «молекул» среди них имеются как «быстрые», так и «медленные», то есть у движущихся шариков существует некоторое распределение скоростей (распределение Максвелла). Затем нужно при помощи ЛАТРа уменьшить подаваемое на вибраторы напряжение. При этом средняя скорость шариков будет уменьшаться, что можно трактовать как демонстрацию ее зависимости от температуры (роль температуры играет интенсивность дрожания вибраторов, которая пропорциональна подаваемому на них напряжению). При нагревании газа в замкнутом объеме (повышении подаваемого на вибраторы

⁸ Д. К. Максвелл (1831 – 1879) – британский физик и математик, член Лондонского королевского общества.

ры напряжения) его давление на стенки растёт, что иллюстрируется увеличением частоты и силы ударов шариков о стенки. Дробовой шум от этих ударов демонстрирует статистическую природу давления, как типичного среднего макроскопического параметра состояния газа. Поместив в прибор несколько стальных шариков большего размера, можно продемонстрировать зависимость средней скорости шариков-«молекул» от их массы – более тяжелые шарики будут двигаться в среднем медленнее, чем легкие.

1.3.2. Понятие времени релаксации. Качественная оценка роли флуктуаций.

Засыпать в прибор около 100 маленьких шариков, расположив их вдоль одной из ограничивающих рабочее поле пластин. Затем включить три остальных вибратора, подав на них максимальное напряжение. Спустя некоторое время включить и оставшийся вибратор, около которого находятся шарики. При этом будет видно, что для перехода системы от одного равновесного состояния (рис. 1.7) к другому (рис. 1.6) – требуется определенное время, называемое временем релаксации.

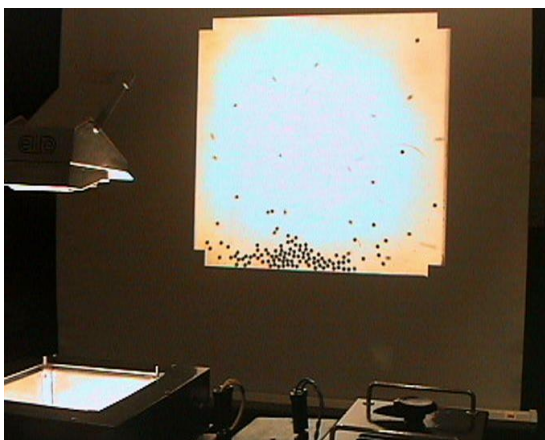


Рис. 1.7. Демонстрация понятия времени релаксации.

После этого следует выключить прибор, снять прозрачную крышку, собрать в углу рабочего поля 10–20 шариков, остальные – вынуть, и поместить в прибор крестообразную перегородку с небольшими отверстиями, разделяющую рабочее поле на четыре равных отсека. Подав напряжение на все вибраторы, наблюдать постепенное распределение оставшихся шариков по всем отсекам через

отверстия в перегородке. Затем выключить прибор, засыпать в прибор еще некоторое количество шариков, доведя их общее число примерно до сотни, снова собрать все шарики в одном отсеке (рис. 1.8) и опять включить все вибраторы. Обратить внимание зрителей на то, что при малом количестве шариков флуктуации их числа в каждом отсеке велики, а при большом количестве шариков они распределяются по отсекам практически равномерно (рис. 1.9). Кроме того, для разбегания шариков по всем отсекам также требуется определенное время, то есть и в этом случае система имеет некоторое время релаксации. Данную демонстрацию можно использовать для введения понятий средних значений чисел заполнения отсеков по времени и по ансамблю.

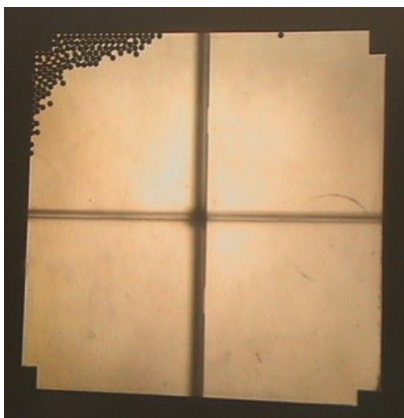


Рис. 1.8.

Качественная оценка роли флуктуаций числа молекул газа – исходное неравновесное состояние системы.



Рис. 1.9.

Качественная оценка роли флуктуаций числа молекул газа – конечное равновесное состояние системы.

1.3.3. Конденсация газа на холодной стенке (случай неравенства температур стенок сосуда).

Засыпать в прибор около 100 маленьких шариков и включить все вибраторы, подав на них максимальное напряжение. Дождавшись, пока система придет в равновесное состояние, при котором все шарики хаотически движутся, выключить один из вибраторов, создав модель газа в сосуде, разные стенки которого имеют различные температуры. При этом на выключенном («холодном») вибраторе будет происходить «конденсация» «молекул газа» – шарики будут скапливаться вблизи пластины, образуя «каплю жидко-

сти» (рис. 1.7). Затем нужно вновь включить неработающий вибратор и выключить другой. После этого можно наблюдать «выкипание капли» вблизи включенного вибратора и конденсацию «пара» вблизи выключенного.

1.3.4. Моделирование броуновского⁹ движения.

Засыпать в прибор около 100 маленьких шариков и поместить в него модель броуновской частицы – тefлоновую шайбу, существенно превосходящую шарики по размерам и массе (рис. 1.10). Включить все вибраторы, подав на них максимальное напряжение, и наблюдать, как под действием ударов маленьких шариков при их хаотических столкновениях с шайбой она будет медленно перемещаться, беспорядочно двигаясь по сложной траектории.



Рис. 1.10.
Моделирование броуновского
движения и движения молекул
двухатомного газа.

1.3.5. Моделирование движения молекул двух- атомного газа.

Засыпать в прибор около 100 маленьких шариков и поместить в него несколько моделей двухатомных молекул – гантелеобразных «частиц» (рис. 1.10). Маленькие твердые гантельки моделируют движение молекул основных газов земной атмосферы – кислорода и азота. Включить все вибраторы, подав на них максимальное напряжение. «Двухатомные молекулы» под действием

ударов маленьких шариков будут беспорядочно двигаться по рабочему полю прибора, вращаясь в разные стороны, моделируя поступательные и вращательные степени свободы таких «молекул».

Все эти демонстрации можно показывать и совместно, одновременно засыпав в прибор шарики разных размеров и поместив в него модели двухатомных молекул и «броуновскую частицу».

⁹ Явление открыто в 1827 г. английским ботаником Р. Брауном (1773 – 1858), членом Лондонского королевского общества, при исследовании под микроскопом пыльцы растений.

1.4. Распределение молекул в поле силы тяжести (модель С. И. Усагина).

Демонстрируется механическая модель (предложена Р. Полем¹⁰, модернизирована С. И. Усагиным¹¹), при помощи которой можно показать распределение молекул в поле силы тяжести (см. рис. 1.11). Дно A вертикального прозрачного сосуда может приводиться в колебательное движение электромагнитным вибратором B . На дне находятся несколько десятков шариков, моделирующих одноатомные молекулы газа. При постепенном повышении переменного напряжения, подаваемого на вибратор, молекулы начинают подпрыгивать над дном сосуда – тем выше, чем выше «температура» газа. Видно, что на разных высотах средние концентрации «молекул» различны – плотность газа убывает с высотой в соответствии с распределением Больцмана¹². Модель позволяет также показать причину возникновения давления газа на стенки сосуда и статистическую природу этого давления. Для этого «газ» над вибратором накрывается подвижным поршнем C , соединенным перекинутой через блок нитью с грузиком-противовесом D , который чуть легче, чем поршень. При повышении напряжения на вибраторе шарики все сильнее ударяют-

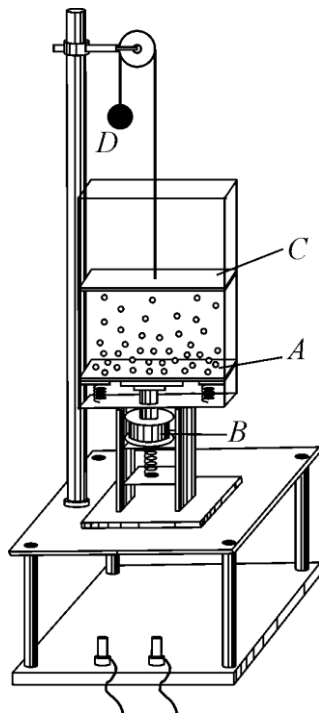


Рис. 1.11. Модель С. И. Усагина (распределение молекул в поле силы тяжести).

¹⁰ Р. В. Поль (1884 – 1976) – профессор Геттингенского университета, автор широко известных учебников.

¹¹ С. И. Усагин (1889 – 1979) – заведующий КФД физического факультета МГУ с 1950 г. по 1975 г.

¹² Л. Больцман (1844 – 1906) – австрийский физик, заложил основы статистической механики и молекулярно-кинетической теории. Член Австрийской академии наук, член-корреспондент Петербургской академии наук.

ся о поршень, поднимая его вверх, причем хорошо видны хаотические колебания, вызываемые флуктуациями давления.

1.5. Изменение давления газа с высотой.

1.5.1. Опыт с пламенами.

Установка представляет собой стеклянный сосуд длиной около 1,5 м, в середине которого сделана специальная оттяжка, позволяющая подключать сосуд к источнику газа. Вблизи концов сосуда проделаны два отверстия с наклеенными над ними металлическими патрубками, которые используются в качестве горелок. Отверстия под патрубками затянуты металлическими сеточками-пламегасителями. Сеточки должны быть одинаковыми, чтобы при горизонтальном положении сосуда языки пламени, выходящие из патрубков, имели равную высоту (рис. 1.12).

Демонстрируется изменение давления газа с высотой, которое соответствует распределению Больцмана. В стеклянный сосуд подается природный газ – метан, который примерно вдвое легче воздуха. Газ поджигают при большом напоре, который через 10-15 секунд горения уменьшают до нормального (это делается для того, чтобы исключить проскакивание пламени внутрь трубки). При горизонтальном положении трубки языки пламени имеют одинаковую высоту, которая определяется разностью давлений метана внутри трубки и воздуха снаружи. Если наклонить трубку (рис. 1.13), то у ее верхнего конца давление более тяжелого газа – воздуха – упадет сильнее, чем у более легкого газа – метана, разность давлений станет больше, и высота верхнего языка пламени увеличится. У нижнего конца трубки, наоборот, давление воздуха возрастет сильнее, чем давление метана внутри трубки, и высота языка пламени уменьшится.

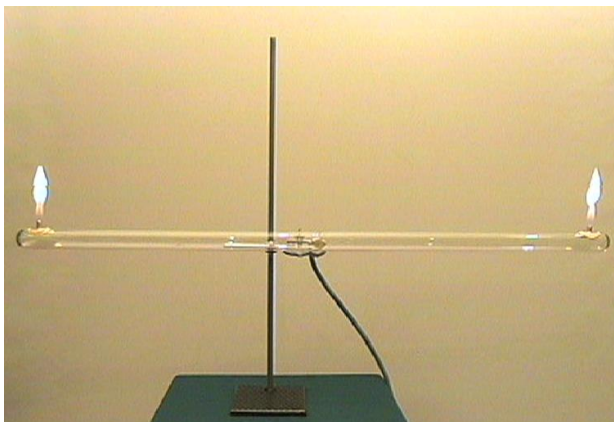


Рис. 1.12.

Прибор для демонстрации изменения давления газа с высотой.

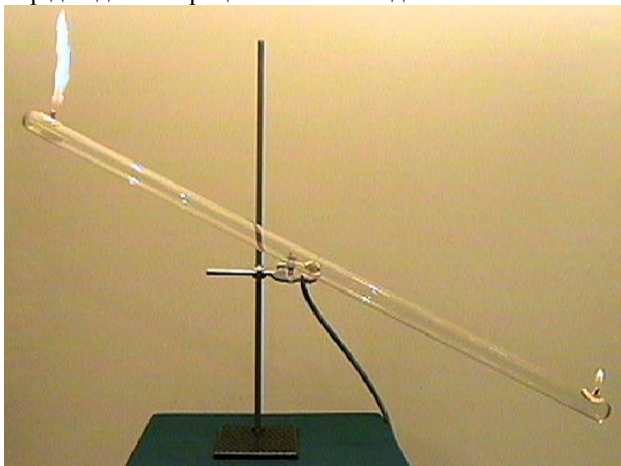


Рис. 1.13.

Демонстрация изменения давления газа с высотой.

Для большей убедительности опыт нужно повторить несколько раз, поочередно наклоняя сосуд в разные стороны. Для объяснения опыта следует продемонстрировать нарисованные на аудиторной доске графики зависимостей давления воздуха и метана от высоты. Если же пропускаемый через сосуд газ тяжелее воздуха (например, если это пропан-бутановая смесь), то все будет происходить наоборот: на нижнем конце сосуда язык пламени при наклоне будет увеличиваться, а на верхнем – уменьшаться.

1.5.2. Опыт с шаром, наполненным легким газом.

Для показа опыта необходимо наполнить воздушный шарик легким газом (например, метаном из газовой магистрали) и привязать к нему груз в виде полоски бумаги или картона. Массу груза нужно подобрать такой, чтобы шарик, находясь в равновесии, парил на небольшой высоте над аудиторным столом (рис. 1.14). После того, как аудитория



Рис. 1.14.

Опыт с шаром, наполненным легким газом.

убедится в устойчивости такого парения, демонстратор отрезает от прикрепленной к шарiku бумаги небольшой кусочек. В результате шар поднимается вверх и устойчиво парит на большей высоте, что свидетельствует об уменьшении плотности (а значит, и давления атмосферного воздуха) с высотой – шар парит на той высоте, на которой вес воздуха в объеме шара равен весу оболочки шара с легким газом и бумагой. При отрезании еще одного кусочка бумаги шарик поднимается на еще бoльшую высоту, и вновь неподвижно за висает. При показе опыта в высокой лекционной аудитории к шарiku необходимо предварительно привязать тонкую нить, за которую высоко поднявшийся шарик можно будет подтягивать обратно для очередного уменьшения массы привязанной к нему бумаги.

1.5.3. Подъем бутылки с воздухом на высоту аудиторного балкона.

Высота балкона в больших аудиториях физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова составляет примерно 8 м. Таким образом, изменение атмосферного давления при подъеме на балкон составляет $\rho gh \approx 1,3 \text{ кг/м}^3 \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 8 \text{ м} \approx 100 \text{ Па}$, и эта величина может быть измерена чувствительным манометром. Для демонстрации уменьшения атмосферного давления с ростом высоты используется большая закрытая стеклянная бутылка объемом $\sim 20 \text{ л}$, соединенная трубкой с микроманометром, который позволяет измерять разность давлений в диапазоне $\pm 200 \text{ Па}$. На трубке имеется отвод с краном, при открывании которого бутылка сообщается с атмосферой для выравнивания давлений в начале опыта (см. рис. 1.15а). После закрытия крана бутылку поднимают до уровня балкона, и манометр показывает, что давление в ней превышает давление окружающего воздуха примерно на 100 Па (см. рис. 1.15б¹³). Опустив бутылку вниз, убеждаются, что разность давлений воздуха в бутылки и вне ее снова упала до нуля. Перед началом демонстрации надо дождаться установления теплового равновесия бутылки с окружающей средой и не трогать установку руками в течение всего опыта. После подъема наверх и фиксации показаний манометра бутылку следует немедленно опустить вниз, пока она не успела изменить свою температуру, поскольку на уровне балкона температура воздуха может отличаться от той, что

¹³ Опыт демонстрирует А. А. Якута.

имеется внизу. Для убедительности опыт следует повторить еще раз.



Рис. 1.15а. Бутылка с манометром на столе.



Рис. 1.15б. Бутылка с манометром на уровне балкона аудитории.

1.6. Измерение температуры.

1.6.1. Модель газового термометра.

Демонстрируется модель газового термометра, которая состоит из двух стеклянных колб, заполненных воздухом при атмосферном давлении, и соединяющего их U-образного манометра. Пока температура колб одинакова, разность давлений в них отсутствует, и уровень жидкости в коленах манометра одинаков (если перед началом демонстрации присутствует небольшая разность давлений в колбах, то следует открыть краны, соединяющие колбы с атмосферой, и после выравнивания давлений закрыть их). После

нагревания одной из колб руками давление в ней растёт пропорционально её абсолютной температуре, что фиксируется U-образным манометром (см. рис. 1.16). Если теперь нагревать другую колбу, то вначале разность давлений падает до нуля, а затем изменяет знак, что свидетельствует о выравнивании температур колб и дальнейшем повышении температуры второй колбы. Таким образом, измеряя давление в некотором постоянном объеме газа, близкого по свойствам к идеальному (а воздух при нормальных условиях как раз таковым и является), можно измерять его абсолютную температуру.

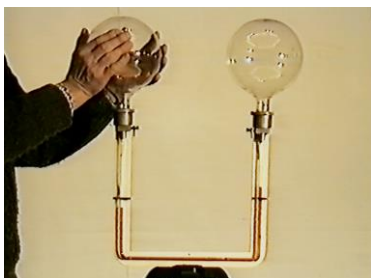


Рис. 1.16.
Газовый термометр.

Работа газового термометра основана на том обстоятельстве, что разреженные газы с большой точностью подчиняются закону Клапейрона¹⁴: $pV = \text{const} \cdot T$, где p , V и T – давление, объем и температура газа. Исходя из этого закона, можно принять произведение pV за термометрическую величину, а сам газ – за термометрическое тело, и

построить таким образом идеально-газовую шкалу температур и газовый термометр. Такой термометр можно реализовать двумя способами: поддерживать постоянным объем газа V и определять температуру по величине давления, либо фиксировать давление p и судить о температуре по объему газа; на практике более удобен первый способ.

При показе данной демонстрации нужно обратить внимание зрителей на принцип работы газового термометра, а также обсудить трудности, которые приходится преодолевать при его практическом использовании. В частности, для повышения точности измерения температуры при работе с современными газовыми термометрами их рабочую часть постоянного объема соединяют с измерителем давления при помощи тонкого капилляра и учитывают неидеальность газа, тепловое расширение стенок рабочей части, адсорбцию газа, влияние неодинаковости температур газа в рабочей части и в капилляре, а также некоторые другие эффекты. Учет

¹⁴ Б. П. Э. Клапейрон (1799 – 1864) – французский физик и инженер, член Парижской академии наук.

малых поправок, обусловленных этими эффектами, позволяет довести точность измерения температуры при помощи газового термометра до $\sim 10^{-3}$ К, но сильно затрудняет его использование. Поэтому газовые термометры обычно применяются в качестве *первичных* (эталонных), используемых для градуировки других, более удобных в применении, термометров, а также в некоторых лабораториях для научных исследований.

1.6.2. Ртутные термометры (влияние теплоемкости термометра на результат измерения).

Демонстрируется измерение температуры в небольшом стакане с водой, которая только что вскипела (то есть температура воды должна быть близка к $+100$ °С). Если проводить эти измерения при помощи очень большого ртутного термометра (рис. 1.17), то он показывает только около $+92$ °С, а при измерениях маленьким термометром получается $+97$ °С (перед вторым измерением воду в стакане необходимо повторно довести до кипения). Таким образом, для получения достоверных результатов измерений необходимо правильно выбирать измерительные приборы. В частности, при измерениях температуры какого-то тела теплоемкость термометра должна быть малой по сравнению с теплоемкостью этого тела.



Рис. 1.17. Демонстрация влияния размеров термометра на результат измерения.

1.7. Измерение давления.

1.7.1. U-образный манометр.

Для измерения давления часто используют манометры, состоящие из U-образной стеклянной трубки, в которую налита жидкость, и шкалы, по которой можно измерять разность уровней этой жидкости в коленях манометра. Один конец трубки открыт в атмосферу, а к другому можно присоединить сосуд, в котором измеряется давление. Для расчета разности атмосферного давления и давления в сосуде используется формула $\Delta p = \rho gh$, где ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, а h – разность высот данной жидкости в коленях манометра. Поэтому на практике часто

используются внесистемные единицы измерения давления – миллиметры ртутного или водяного столба.

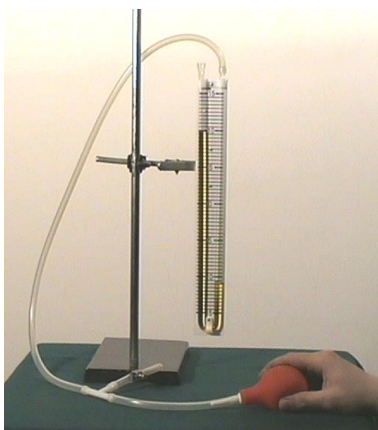


Рис. 1.18.
U-образный манометр.

Манометр крепится на штативе в вертикальном положении, и одно из его колен при помощи шлангов через тройник соединяется со спринцовкой, которая используется для создания избыточного давления или разрежения (рис. 1.18). Второе колено манометра сообщается с атмосферой. На свободный выход тройника надевается кусочек шланга, который можно пережимать при помощи зажима, отсекая таким образом внутренний объем колена, соединенного со спринцовкой, от атмосферы.

Перед показом демонстрации нужно аккуратно затянуть зажим так, чтобы высоты столбов жидкости в коленах манометра остались одинаковыми. Затем несколько раз медленно сжать и отпустить спринцовку, демонстрируя изменение уровней жидкости в коленах манометра при сжатии спринцовки и возвращение уровней в исходное положение при ее отпускании. Затем отсоединить спринцовку от шланга, сжать ее и, не разжимая, вновь аккуратно подсоединить к шлангу. Медленно отпуская и снова сжимая спринцовку, продемонстрировать изменение уровней при отпускании спринцовки и их возвращение в исходное положение при ее сжатии. Обратит внимание, что уровни жидкости при проведении первого и второго опытов смещаются в разные стороны.

1.7.2. Сравнение чувствительности U-образных манометров.

Демонстрируется различие показаний одинаковых манометров, в которые залиты жидкости разной плотности. Установка состоит из трех одинаковых U-образных манометров, установленных на штативах в вертикальном положении. В один манометр заливается трансформаторное масло (плотность $\sim 0,80 \div 0,85 \text{ г/см}^3$), во второй – подкрашенная вода, в третий – концентрированный водный раствор медного купороса (плотность $\sim 1,15 \div 1,20 \text{ г/см}^3$). Уровни жидкостей в ко-

ленах манометров должны совпадать с нулевыми делениями шкал, а шкалы должны находиться на одной высоте. У каждого из манометров одно колено сообщается с атмосферой. Другие колена манометров при помощи шлангов и двух тройников соединяются друг с другом и со спринцовкой, служащей для создания избыточного давления. Второй тройник необходим для сообщения подсоединенных к спринцовке колен манометров с атмосферой (см. демонстрацию **1.7.1**).

При показе опыта нужно несколько раз медленно сжать и отпустить спринцовку, обращая внимание зрителей на то, что при создании одинакового давления разность уровней в коленах манометра, заполненного маслом, больше, чем в коленах манометра, заполненного водой, а последняя, в свою очередь, больше разности уровней в коленах манометра, заполненного раствором медного купороса (на рис. 1.19 манометры для большей наглядности заполнены маслом, раствором медного купороса и ртутью, однако этот вариант опыта можно демонстрировать только в видеозаписи). Можно

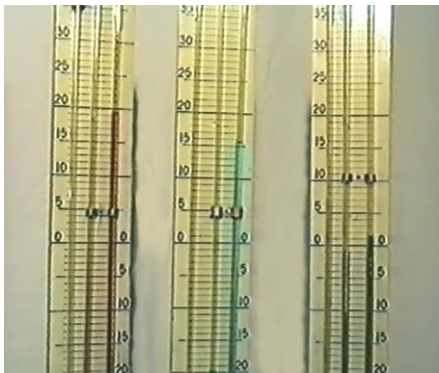


Рис. 1.19.

Сравнение чувствительности
U-образных манометров.

убедиться, что показания манометра с маслом превышают показания манометра с купоросом приблизительно в 1,3 раза, что примерно соответствует отношению плотностей медного купороса и масла. Однако манометр с маслом при большей чувствительности позволяет измерять давление в меньшем диапазоне, чем аналогичный по конструкции и размерам манометр с раствором купороса. Это связано с тем, что U-образный манометр можно использовать для измерения лишь таких давлений, которые могут быть уравновешены разностью давлений столбов жидкости в его коленах (при больших давлениях жидкость из манометра вытекает). Следовательно, при одинаковых длинах U-образных трубок большее давление можно измерять манометром, в который залита более плотная жидкость. Таким образом, при выборе жидкости для заливания в манометр нужно учитывать как диапазон давлений, которые предполагается измерять, так и необходимую в планируемом эксперименте чувствительность.

1.7.3. Манометр Бурдона¹⁵.

Демонстрируется принцип действия манометра Бурдона, который часто используется в технике. Манометр состоит из запаянной металлической изогнутой плоскоовальной трубки, к концам которой с помощью рычажков прикреплена стрелка (рис. 1.20). При подаче давления внутрь трубки (например, с помощью спринцовки) она «разгибается», и стрелка отклоняется на некоторый угол, пропорциональный давлению. Чувствительность такого манометра зависит от жесткости трубки. В технических манометрах



Рис. 1.20.
Манометр Бурдона.

данного типа обычно используется зубчатая передача от конца трубки к стрелке, позволяющая сильно увеличить максимальный угол поворота стрелки и повысить, таким образом, чувствительность манометра. В настоящее время используются более совершенные модели манометров Бурдона, в которых плоскоовальная трубка скручена в виде одновитковой трубчатой пружины – такую конструкцию в 1849 году запатентовал сам Э. Бурдон.

1.7.4. Барометр-анероид.

Усовершенствованным вариантом манометра Бурдона является барометр-анероид (название происходит от древнегреческого $\alpha\text{-}$ «не-» и $\nu\eta\rho\acute{o}\nu$ «вода» – то есть «безводный», действующий без жидкости барометр). Основным чувствительным элементом барометра этого типа является герметичная цилиндрическая металлическая коробка с гофрированными для придания им большей подвижности основаниями. Внутри коробки создано разрежение (по отношению к некоторому среднему атмосферному давлению). При изменении атмосферного давления коробка сжимается или раздувается и приводит в движение пружину, которая, в свою очередь, через систему рычагов двигает вдоль шкалы указательную стрелку.

¹⁵ Э. Бурдон (1808 – 1884) – французский ученый, в 1848 г. предложил использовать для оценки давления согнутую плоскоовальную трубку, названную в дальнейшем его именем.

Погрешность измерения давления при помощи барометра-анероида составляет $\sim 100 - 200$ Па. Благодаря своей портативности и сравнительно высокой точности такие барометры широко применяются в быту и в научных экспедициях; по этой причине заводы-изготовители часто помещают барометры в специальные противоударные корпуса (рис. 1.21). В частности, барометр-анероид можно использовать как высотомер. В этом случае шкалу барометра удобнее отградуировать непосредственно в метрах.



Рис. 1.21.
Барометр-анероид.

1.7.5. Опыт Торричелли¹⁶.

В классическом опыте Торричелли пустота над уровнем ртути в запаянном конце трубки возникает лишь в том случае, когда длина трубки в миллиметрах превышает атмосферное давление, выраженное в миллиметрах ртутного столба (см. рис. 1.22).



Рис. 1.22. Опыт Торричелли демонстрирует М. В. Семенов.

Одним из вариантов опыта является демонстрация U-образного ртутного манометра высотой около 200 мм под стек-

¹⁶ Э. Торричелли (1608 – 1647) – итальянский математик и физик.

лянным колоколом форвакуумного насоса (см. рис. 1.23). Пока не включена откачка, пустое пространство над уровнем ртути в трубке отсутствует. После включения насоса давление под колоколом падает, и когда оно достигнет разности высот столбиков ртути в сообщающихся трубках манометра, над ртутью в первоначально пол-



Рис. 1.23. U-образный манометр под колоколом форвакуумного насоса.

ностью заполненной трубке появляется «торричеллиева пустота», объем которой растет по мере откачки пространства под колоколом. После выключения насоса при медленном напуске воздуха под колокол наблюдается увеличение разности высот ртути в коленях манометра — до тех пор, пока пустота не исчезнет.

Проведение опытов со ртутью на лекциях не разрешается по правилам техники безопасности, поэтому указанные демонстрации могут быть показаны только в видеозаписи. Величина атмосферного давления может быть измерена на лекции при помощи точного барометра-анероида, имеющегося в Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Демонстрация может использоваться также при чтении раздела «Механика» курса общей физики (см. книгу «Механика. Лекционный эксперимент» [17], демонстрация **8.8.1**).

Глава 2

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

Лекционные эксперименты, демонстрирующие явления переноса в газах, обычно иллюстрируют и дополняют изложение элементарной статистической теории этих явлений и должны показываться в первой части курса молекулярной физики, посвященной статистическому рассмотрению молекулярных систем, состоящих из большого числа частиц (см., например, [14], глава 13).

2.1. Вязкость газа.

Явление вязкости газа демонстрируется при помощи установки, состоящей из двух прозрачных дисков на валу электромотора и легкой стрелки с лопаточкой, которая помещена между дисками (рис. 2.1, слева). Стрелка может поворачиваться на горизонтальной оси, а угол ее отклонения можно отсчитывать по шкале. После включения мотора диски увлекают воздух, на лопаточку начинают действовать силы вязкого трения, и стрелка отклоняется. Направление ее отклонения меняется при изменении направления вращения дисков, а величина отклонения зависит от скорости их вращения: с ее ростом отклонение стрелки увеличивается, свидетельствуя об увеличении силы вязкого трения, действующей на лопаточку со стороны воздуха.



Рис. 2.1. Установки для демонстрации вязкости газа.

Другой вариант демонстрации показан на рисунке 2.1 справа. На оси центробежной машины при помощи конической насадки горизонтально установлена круглая платформа, и на небольшой высоте над ней подвешен металлический диск с удаленной центральной частью, удерживаемый в горизонтальном положении при помощи бифилярного подвеса. О силах вязкого трения, возникаю-

щих при вращении платформы, судят по повороту подвешенного металлического диска. Для удобства наблюдения на верхней стороне диска нанесена черная радиальная линия, напротив которой на столе ставится указатель.

Демонстрация используется также при чтении раздела «Механика» курса общей физики (см. книгу «Механика. Лекционный эксперимент» [17], демонстрация 5.9.9).

2.2. Зависимость вязкости газа от температуры.

Вязкость газов, в отличие от жидкостей, с ростом температуры возрастает. Это демонстрируется при помощи установки, в которой природный газ – метан – подается из сети через тройник в две трубки, имеющие сужения, и на выходе из этих трубок поджигается. Пока температуры трубок и газа в них одинаковы, языки пламени имеют одинаковую высоту (рис. 2.2, слева). Если подогревать дополнительной горелкой или мощным термофеном сужение на одной из трубок, создающее основное сопротивление потоку газа, то язык пламени на выходе из данной трубки уменьшается (рис. 2.2, справа). После окончания нагрева языки пламени постепенно выравниваются по высоте, а при нагревании суженного участка другой трубки выходящий из нее язык пламени также уменьшается. Это свидетельствует об увеличении вязкости метана при нагревании.

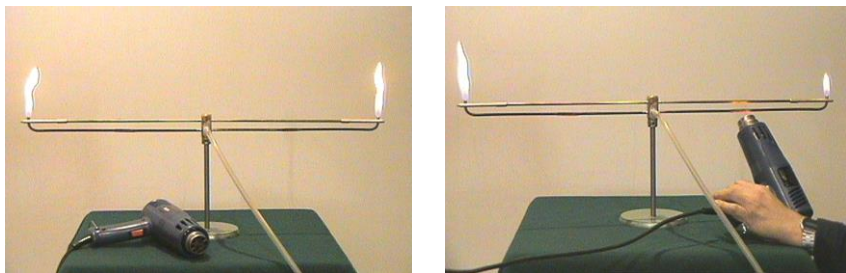


Рис. 2.2. Демонстрация зависимости вязкости газа от температуры.

Идея данного эксперимента состоит в следующем. Масса газа Q , протекающая через трубку в единицу времени при небольшой разности давлений Δp на концах трубки ($\Delta p = p_1 - p_2 \ll p_1, p_2$), обратно пропорциональна кинематической вязкости газа η_k . Если по трубке пропускать горючий газ, то о количестве газа, протекающего по трубке, можно судить по высоте языка пламени, возникающего при поджигании газа на выходе из трубки.

Молекулярно-кинетическая теория дает для коэффициента кинематической вязкости газа следующее выражение: $\eta_k = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle$.

Средняя скорость молекул при максвелловском распределении

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}, \text{ средняя длина свободного пробега } \langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma}.$$

С учетом уравнения состояния идеального газа $p = nkT$ для η_k получает-

$$\text{ся: } \eta_k = \frac{2k^{3/2}}{3\sigma p \sqrt{\pi m_0}} T^{3/2}, \text{ где } m_0 \text{ — масса молекулы, } k \text{ — постоянная}$$

Больцмана, n — концентрация молекул, σ — сечение рассеяния молекул газа. Давление в газовой сети невелико по сравнению с атмосферным, поэтому можно считать, что внутри трубки $p \approx \text{const}$, и если пренебречь зависимостью σ от температуры T , то получаем $\eta_k \sim T^{3/2}$, и $Q \sim T^{-3/2}$. В соответствии с этой формулой масса газа, протекающая через трубку в единицу времени, с ростом температуры газа должна уменьшаться. Это, в свою очередь, приводит к заметному уменьшению языка пламени на выходе из нагретой трубки, что и наблюдается во время демонстрации.

Следует отметить, что эффектами, связанными с тепловым расширением просвета трубки, в данной ситуации можно пренебречь (при изменении абсолютной температуры T в два раза они не превышают 2%, тогда как η_k при этом изменяется в $\sim 2,8$ раза).

2.3. Независимость вязкости газа от давления.

Для демонстрации независимости вязкости газа от давления (вплоть до достижения состояния вакуума) используется установка, основным элементом которой является цилиндрический сосуд с прозрачной передней стенкой, внутри которого может быстро вращаться сплошной цилиндр, отделенный от стенок сосуда небольшим (~ 1 мм) зазором (рис. 2.3, слева). Вращение передается от электромотора валом, пропущенным через сальник. Скорость вращения регулируется при помощи реостата, включенного последовательно с электромотором. Сосуд может откачиваться форвакуумным насосом, а давление в нем измеряется вакуумметром. В верхней части зазора между цилиндрами имеется вставка, уменьшающая его толщину до $\sim 0,2$ мм. Ввиду наличия вязкости газа внутренний цилиндр при вращении с большой угловой скоростью

увлекает за собой воздух, и между концами суженной части зазора возникает разность давлений, которая фиксируется U-образным манометром, установленным над сосудом. После включения насоса при постепенном уменьшении давления в сосуде от атмосферного вплоть до минимального значения (~ 100 мм ртутного столба) показания U-образного манометра не изменяются (рис. 2.3, справа), что свидетельствует о независимости вязкости воздуха от давления в широком диапазоне изменения давления.

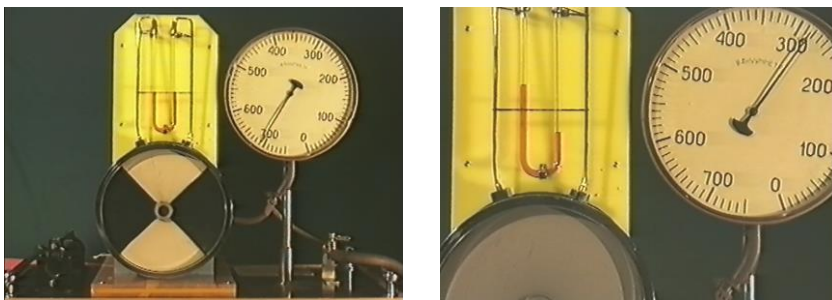


Рис. 2.3. Демонстрация независимости вязкости газа от давления.

2.4. Сравнение теплопроводностей воздуха и метана.

Демонстрируется различие теплопроводности воздуха и метана. Установка (рис. 2.4) представляет собой стойку, к нижней части которой привинчена массивная подставка, а на верхней укреплен металлический держатель. В держатель с двух сторон ввинчены латунные вставки, в которые герметично вклеены одинаковые кварцевые трубки так, что они находятся в горизонтальном положении. На противоположные концы трубок герметично наклеены

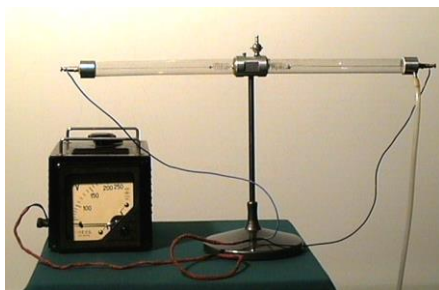


Рис. 2.4. Установка для сравнения теплопроводностей воздуха и метана.

заглушки. Одна из трубок постоянно сообщается с атмосферой через просверленное в заглушке небольшое отверстие, а во вторую через специальный патрубок, находящийся на другой заглушке, через шланг может напускаться метан. Для того чтобы эту трубку было удобно наполнять газом, в верхней части

держателя около другого конца этой трубки проделано отверстие, в которое ввинчен кран. Вдоль оси каждой трубки проходит нихромовая проволока диаметром 0,5 мм. Один ее конец пропускается через заглушку и фиксируется на ней при помощи находящегося снаружи винта, а другой конец при помощи еще одного винта крепится со стороны держателя к небольшой пружине, служащей для натяжения проволоки. Второй конец этой пружины закреплен в специальном цилиндрическом зажиме. Оба цилиндрических зажима, удерживающие концы пружин, пропущены через отверстие в держателе и свинчены друг с другом. Прикрепленные к пружинам концы проволок соединены друг с другом проводом, обеспечивающим электрический контакт проволок. Снаружи на торцах заглушек на приборе имеются специальные клеммы, служащие для подсоединения концов проволок к источнику напряжения. Для обеспечения электробезопасности внутри всех металлических частей, через которые проходят проволоки, имеются диэлектрические прокладки, изолирующие находящуюся под напряжением проволоку от стойки, держателя и заглушек. Уплотнительная прокладка, находящаяся внутри держателя, обеспечивает, кроме того, изоляцию друг от друга внутренних объемов трубок. Питание прибора напряжением $\sim(25 \div 27)$ В осуществляется от лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа), но лучше, если это возможно, пользоваться трансформатором с раздельными обмотками.

О величине теплопроводности газов, заполняющих трубки, судят по яркости свечения нагретых электротокком проволок. Яркость свечения нагретой проволоки определяется ее температурой, которая, в свою очередь, определяется величиной теплоотдачи с поверхности проволоки. Величина же теплоотдачи тем больше, чем выше теплопроводность окружающего проволоку газа. Таким образом, проволока будет светиться тем менее ярко, чем больше теплопроводность находящегося в трубке газа.

Выражение для коэффициента теплопроводности газа λ , согласно молекулярно-кинетической теории, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{1}{3} \rho \langle l \rangle c_V^{уд} \langle v \rangle = \frac{1}{3\sqrt{2}} \frac{\rho c_V^{уд}}{n\sigma} \langle v \rangle = \frac{1}{3\sqrt{2}} \frac{m_0 c_V^{уд}}{\sigma} \langle v \rangle = \\ &= \frac{2}{3} \frac{c_V^{уд}}{\sigma} \sqrt{\frac{kTm_0}{\pi}} = \frac{2}{3} \frac{c_V^{мол}}{\sigma} \sqrt{\frac{kT}{\pi N_A \mu}}.\end{aligned}$$

Здесь n , ρ , μ и $c_V^{\text{уд}}$ – концентрация, плотность, молярная масса и удельная изохорическая теплоемкость газа, $c_V^{\text{мол}} = c_V^{\text{уд}}/\mu$ – молярная теплоемкость газа при постоянном объеме, остальные обозначения введены в описании демонстрации 2.2.

Из записанных соотношений видно, что коэффициент теплопроводности газа при фиксированной температуре пропорционален произведению $\frac{c_V^{\text{мол}}}{\sigma\sqrt{\mu}}$. Так как изохорические молярные теплоемко-

сти метана и воздуха и эффективные сечения их молекул примерно одинаковы, а молярная масса метана примерно вдвое меньше, чем воздуха, то метан, в соответствии с приведенной формулой, должен иметь теплопроводность приблизительно в полтора раза большую, чем воздух. Этот вывод качественно подтверждается данной демонстрацией – проволока в заполненной метаном трубке будет светиться слабее.

Следует отметить, что полученная теоретическая оценка достаточно хорошо согласуется с приведенными в таблицах экспериментальными данными: при изменении температуры от ~ 300 К до ~ 600 К теплопроводность метана изменяется в пределах $\lambda_{\text{мет}} \sim (34 \div 90) \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К), теплопроводность воздуха – $\lambda_{\text{возд}} \sim (25 \div 47) \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К), а их отношение варьируется в интервале $\sim (1,3 \div 1,9)$.

Перед началом демонстрации необходимо пригасить свет в аудитории. Затем включить ЛАТР в сеть ~ 220 В и, осторожно поворачивая ручку регулировки, установить рабочее выходное напряжение. При этом обе проволоки в приборе начнут светиться

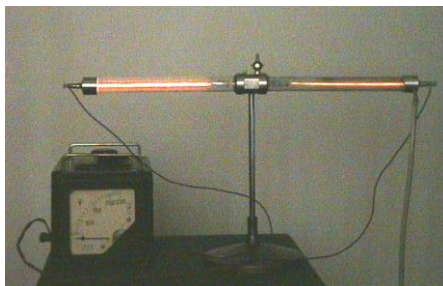


Рис. 2.5. Сравнение теплопроводностей воздуха и метана.

неярким красным светом. Обратить внимание зрителей на то, что яркость свечения проволок практически одинакова. Затем открыть кран газовой магистрали и пропускать метан через трубку прибора до тех пор, пока она вся не заполнится им (об этом можно будет судить по примерной одинаковости

накала проволоки вдоль всей длины продуваемой метаном трубки). Перекрыть кран, расположенный на держателе прибора, и затем отключить подачу газа. Обратит внимание зрителей на то, что яркость свечения проволоки в заполненной метаном трубке значительно уменьшилась по сравнению с трубкой, в которой находится воздух (рис. 2.5). Далее нужно отсоединить шланг от газовой магистрали, открыть расположенный на держателе прибора кран и продуть трубку воздухом (для этого проще всего использовать воздух, выдыхаемый из легких). Яркость свечения потускневшей проволоки после вытеснения из трубки метана и наполнения ее воздухом восстановится. После окончания демонстрации вывести ручку ЛАТРа в положение, соответствующее нулевому значению выходного напряжения, выключить ЛАТР из сети и сразу же отсоединить от него обе клеммы прибора.

2.5. Независимость теплопроводности газа от давления.

Как следует из теоретического рассмотрения, проведенного при описании демонстрации 2.4, коэффициент теплопроводности газа не зависит от давления. Демонстрационная установка, предназначенная для проверки этого факта, состоит из четырех вертикальных стеклянных трубок – двух большого диаметра и двух малого диаметра, – по оси которых натянута одинаковая нихромовая проволока, соединенные последовательно (рис. 2.6). Проволоки раскаляются постоянным током, и яркость свечения позволяет судить об их температуре. В одном широком и одном тонком цилиндрах поддерживается атмосферное давление, а другие широкий и тонкий цилиндры могут при помощи вакуумного крана подсоединяться к форвакуумному насосу и откачиваться; давление в них измеряется вакуумметром. Видно, что при уменьшении давления яркость свечения проволоки увеличивается только в откачиваемом широком цилиндре, а в тонких цилиндрах она остается практически одинаковой. Это объясняется тем,

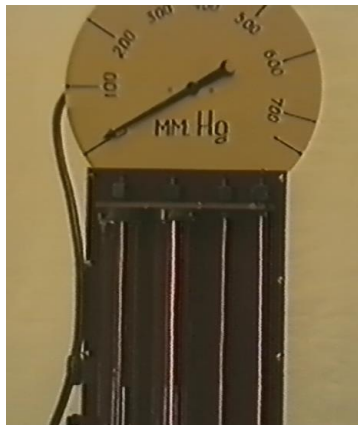


Рис. 2.6. Прибор для демонстрации независимости теплопроводности газа от давления.

что в цилиндре большого диаметра уменьшается теплоотдача за счет конвекции, а в тонких вертикальных цилиндрах, где конвекция подавлена, основным механизмом теплоотдачи является теплопроводность, и она не зависит от давления вплоть до состояния вакуума.

2.6. Модель диффузии.

Для демонстрации модели диффузии используется стол с воздушной подушкой, представляющий собой квадратную коробку, в прозрачном пластиковом дне которой просверлено множество маленьких отверстий. На этом столе находятся модели молекул газов в виде разноцветных шайб с магнитами, отталкивающиеся друг от друга, и перегородка с отверстием, разделяющая стол на два отсека. В стенки коробки и в перегородку также вмонтированы магниты, и поэтому модели молекул отталкиваются также от стенок и от перегородки.

Перед началом опыта все шайбы одного цвета (красные) находятся по одну сторону от перегородки, а все шайбы другого цвета (зеленые) – по другую сторону от нее. После начала подачи воздуха в стол через отверстия шайбы приходят в хаотическое

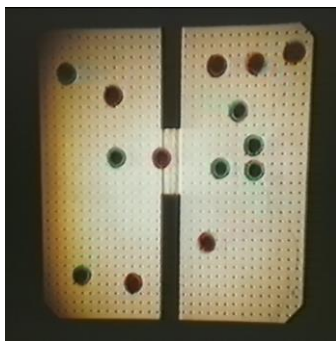


Рис. 2.7. Модель диффузии.

движение, начинают переходить из отсека в отсек, причем красные и зеленые шайбы постепенно перемешиваются, что моделирует процесс взаимной диффузии газов. Через некоторое время система приходит в наиболее вероятное – равновесное состояние, при котором средние концентрации «молекул» каждого цвета в обоих отсеках примерно (с точностью до флуктуаций) выравниваются (рис. 2.7).

2.7 Диффузия паров брома.

В связи с тем, что бром и его пары сильно токсичны, демонстрацию диффузии паров брома можно показывать только в видеозаписи. Демонстрация идет следующим образом.

Жидкий бром, пары которого имеют яркую желто-оранжевую окраску, наливают в маленькую чашечку и накрывают перевернутым цилиндрическим стеклянным сосудом высотой около метра. Бром испаряется, и начинается процесс диффузии паров в воздухе, который идет достаточно медленно. Рядом с сосудом стоят часы, и через каждые 5 – 10 минут видеокамера включается на 10 –



Рис. 2.8. Диффузия паров брома.

15 секунд. Видно, как окрашенные пары брома с течением времени поднимаются вверх, постепенно заполняя сосуд. Через час за счет взаимной диффузии паров брома в воздухе сосуд оказывается практически полностью наполненным этими парами.

2.8 Эффузия газа через пористую перегородку.

2.8.1. Изотермическая эффузия.

Эффузия газа – протекание газа через мелкие поры в веществе. Если размер пор порядка или меньше длины свободного пробега молекул (при атмосферном давлении она составляет $\sim 10^{-5}$ см), то внутри пор газ находится в состоянии вакуума, которое характеризуется тем, что основное влияние на поведение газа оказывают не столкновения молекул между собой, а их соударения со стенками пор. Поэтому если по разные стороны пористой перегородки имеются газы, отличающиеся массой молекул, либо один и тот же газ, но находящийся при разных температурах, то молекулярные потоки этих газов, протекающие через поры, будут независимы друг от друга, и равновесие будет устанавливаться при разных давлениях по обе стороны перегородки. Этим эффузия принципиально отличается от диффузии, происходящей при постоянном давлении.

Число молекул N каждого из газов, протекающее при эффузии в единицу времени через отверстия общей площадью S в пористой перегородке, будет определяться числом ударов молекул об участок стенки той же площади:

$$N = \frac{1}{4} n \langle v \rangle S = \frac{1}{\sqrt{2\pi k}} \frac{pS}{\sqrt{m_0 T}}.$$

(обозначения см. в описании демонстрации 2.2) Из этой формулы следует, что если по разные стороны пористой перегородки находятся газы с различными массами молекул m_{01} и m_{02} при одинаковой температуре T и одинаковых начальных давлениях p , то в первый момент времени после начала процесса эффузии встречные эффузионные потоки газов будут обратно пропорциональны квадратным корням из масс их молекул:

$$\frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{m_{02}}{m_{01}}}.$$

Такая эффузия называется *изотермической*. Из записанной формулы следует, что поток газа через пористую перегородку тем больше, чем легче его молекулы (это связано с тем, что у легких газов средняя скорость молекул $\langle v \rangle$ больше, чем у тяжелых). Вследствие этого в течение некоторого времени после начала эффузии давление по ту сторону перегородки, где сначала был более тяжелый газ, повышается, что можно зафиксировать при помощи манометра.

Для показа демонстрации нужно установить на аудиторном столе U-образный манометр, укрепить на штативе при помощи зажима пористый (например, керамический) сосуд и соединить шлангом выходящую из него трубку с манометром. Положение пористого сосуда следует выбирать в зависимости от того, какой газ будет использоваться для демонстрации. Если этот газ более легкий, чем воздух (например, метан или гелий), то пористый сосуд нужно закреплять так, чтобы выходящая из него трубка была направлена вниз. В противном случае (например, если используется пропан-бутановая смесь или углекислота) сосуд нужно устанавливать трубкой вверх. Затем нужно подготовить большой пустой стеклянный стакан и подсоединить к источнику газа шланг. Дальнейший порядок действий зависит от того, какой газ используется для проведения эксперимента – легкий или тяжелый.

В первом случае нужно перевернуть большой стеклянный стакан вверх дном и при помощи шланга, подсоединенного к источнику газа, напустить газ под стакан. Затем нужно закрыть газовый кран, убрать шланг и надеть стакан сверху на пористый сосуд. Метан из стакана заходит в сосуд быстрее, чем из него через поры выходит воздух, и давление в сосуде начнет расти по сравнению с наружным, что будет фиксироваться по манометру (рис. 2.9, слева).

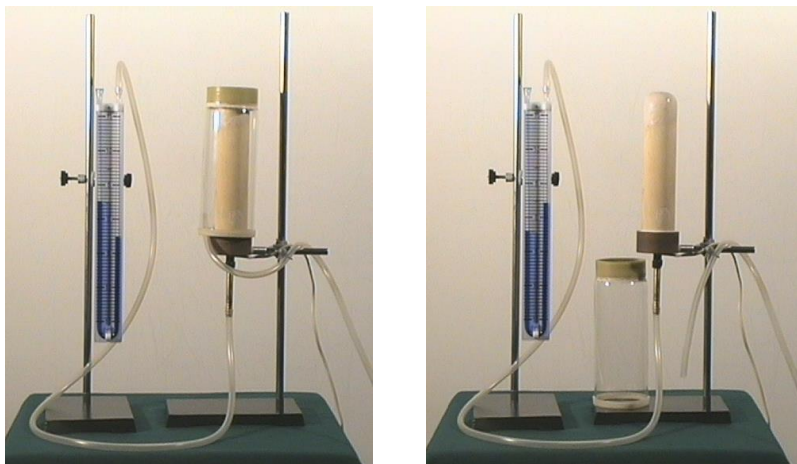


Рис. 2.9. Демонстрация изотермической эффузии.

Дождавшись, пока показываемая манометром разность давлений достигнет значения, близкого к максимальному, нужно снять стеклянный стакан с пористого сосуда и наблюдать обратный процесс: поскольку оставшийся в сосуде метан выходит из него быстрее, чем в сосуд заходит воздух, давление в сосуде начнет падать и вскоре сделается меньше давления снаружи (рис. 2.9, справа). Далее, по мере выхода метана из сосуда и замещения его воздухом, разность давлений будет падать, стремясь к нулю при приближении к равновесному состоянию.

В случае если для демонстрации используется тяжелый газ, следует действовать несколько иначе. Стеклянный стакан нужно поставить на стол, опустить в него идущий от источника газа шланг так, чтобы конец шланга оказался около дна стакана, и открыть газовый кран. Дождавшись, пока тяжелый газ вытеснит из стакана воздух, перекрыть газовый кран, убрать шланг и поднести стакан снизу к пористому сосуду так, чтобы последний оказался полностью погруженным в стакан. После этого давление в сосуде начнет падать по сравнению с наружным, что будет фиксироваться манометром. Выждав некоторое время, нужно убрать стеклянный стакан и наблюдать обратный процесс – давление в пористом сосуде начнет расти и вскоре превысит давление наружного воздуха. Перед показом этого варианта демонстрации следует убедиться, что расстояние между столом и укрепленным в штативе пористым сосудом позволяет поднести к нему снизу стеклянный стакан.

2.8.2. Термоэффузия. Эффект Кнудсена¹.

Как было отмечено выше (см. описание демонстрации 2.8.1), эффузионный поток газа пропорционален давлению, деленному на корень квадратный из произведения массы молекулы газа на абсолютную температуру. Поэтому если по разные стороны пористой перегородки находится один и тот же газ при разных температурах T_1 , T_2 и давлениях p_1 , p_2 , то полный эффузионный поток через перегородку будет равен

$$N = \frac{S}{\sqrt{2\pi km_0}} \left(\frac{p_1}{\sqrt{T_1}} - \frac{p_2}{\sqrt{T_2}} \right).$$

В частности, если в начальный момент времени давления газов по обе стороны перегородки одинаковы, а температуры различны, то газ будет перетекать через пористую перегородку в направлении от более низкой температуры к более высокой, и давление в нагретой области будет повышаться. Такая эффузия называется *тепловой* или *термоэффузией*. Она демонстрируется при помощи пористого сосуда с нагревателем внутри.

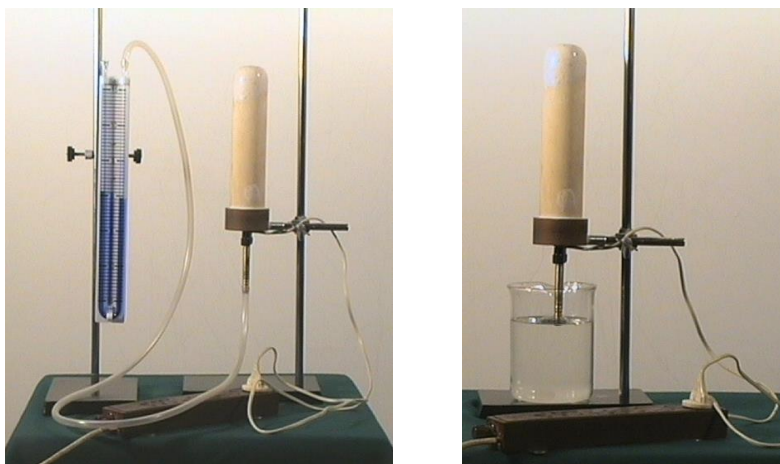


Рис. 2.10. Демонстрация термоэффузии.

Для показа этой демонстрации необходимо установить на аудиторном столе U-образный манометр и укрепить на штативе при помощи зажима пористый сосуд с нагревателем так, чтобы выходя-

¹ М. Г. Х. Кнудсен (1871 – 1949) – датский физик, преподавал и проводил научные исследования в Датском техническом университете.

щая из него трубка была направлена вниз. При помощи шланга соединить трубку с манометром. Подсоединить провода с вилкой к клеммам нагревательного элемента, подготовить стакан с водой и немного мыльного раствора. Вставив вилку в розетку ~ 220 В, подать напряжение на находящийся в пористом сосуде нагревательный элемент. Дождаться, пока установится тепловое равновесие. Так как температура в сосуде выше, чем температура окружающего воздуха, то наружный воздух будет всасываться внутрь через поры, вследствие чего давление внутри сосуда повысится – после полного прогрева сосуда с нагревателем манометр будет показывать небольшую (около 1 см водяного столба) постоянную разность давлений между атмосферой и находящимся в сосуде воздухом (рис. 2.10 слева). Затем можно продемонстрировать наличие избыточного давления в сосуде другим способом. Для этого нужно отсоединить пористый сосуд от манометра и поставить штатив таким образом, чтобы конец выходящей из сосуда трубки оказался погруженным в стакан с водой на глубину 1–2 мм (рис. 2.10, справа). При этом из трубки начнут медленно выходить пузырьки воздуха, которые будут непрерывно идти, пока температура внутри сосуда поддерживается более высокой, чем снаружи. Это явление называется эффектом Кнудсена, а демонстрирующий его эксперимент был предложен Р. Полем.

Так как регистрируемая разность давлений достаточно мала, показания манометра и выход пузырьков удобнее всего наблюдать на большом экране при помощи видеокамеры и проектора, которые нужно заранее подготовить. Для улучшения условий наблюдения рекомендуется капнуть на поверхность воды в стакане немного мыльного раствора. При этом коэффициент поверхностного натяжения уменьшится, и интенсивность выхода пузырьков возрастет (рис. 2.11).

Данный опыт требует достаточно большого времени, необходимого для прогрева пористого сосуда, поэтому его нужно начинать готовить к показу заранее.

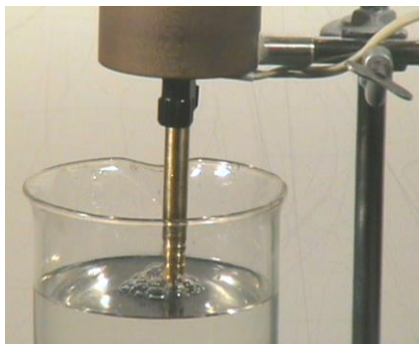


Рис. 2.11. Демонстрация эффекта Кнудсена.

2.9. Радиометрические силы в разреженных газах. Радиометр Крукса².

В разреженных газах возникают так называемые «радиометрические» силы [10, 11] – на неравномерно нагретые тела со стороны газа действуют силы в направлении от горячих частей тел к холодным. Это явление объясняется, во-первых, тем, что молекулы, сталкивающиеся с более нагретыми частями тел, уносят больший импульс, чем те, которые сталкиваются с их менее нагретыми частями. Кроме того, в невысоком вакууме возникает «тепловое скольжение» газа вдоль поверхности тел в направлении от их холодных частей к более горячим, что по третьему закону Ньютона приводит к действию на тела сил в обратном направлении, то есть, как и в первом случае, от горячих частей к холодным. Этим объясняется, в частности, оседание пыли на стенах вблизи горячих батарей отопления.

Неравномерное нагревание тел связано обычно с воздействием на них теплового излучения, силы пропорциональны его интенсивности, и поэтому они называются «радиометрическими». Эти силы направлены противоположно силам светового давления и мешают их обнаружению в не слишком высоком вакууме.

На действии радиометрических сил основана работа так называемого «радиометра Крукса» (рис. 2.12). В откачанном баллоне на игольчатом подвесе уравновешена легкая четырехлопастная слюдяная крыльчатка, у которой крылышки с одной стороны зачернены, а с другой хорошо отражают свет. Если осветить прибор ярким светом (например, солнечным или от настольной лампы), то крыльчатка приходит в быстрое вращение как раз в направлении от горячих частей крылышек к холодным.

Демонстрация используется также при чтении раздела «Оптика» курса общей физики.



Рис. 2.12.
Радиометр Крукса.

² У. Крукс (1832 – 1919) – английский физик и химик, член (в 1913 – 1915 гг. – президент) Лондонского королевского общества, открыл радиометрический эффект и изготовил радиометр в 1874 г.

Глава 3

ТЕПЛОТА И РАБОТА. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

После завершения показа лекционных экспериментов, иллюстрирующих статистические закономерности, изучаемые в первой части раздела «Молекулярная физика» курса общей физики, можно переходить к опытам, демонстрирующим термодинамический подход к явлениям в системах, состоящих из многих частиц. При этом начинать следует с иллюстрации основных понятий – теплоты, работы и их взаимосвязи в рамках первого начала термодинамики [10].

3.1 Превращение работы в теплоту.

3.1.1. Опыт Тиндаля¹.

Демонстрируется превращение работы в теплоту. В «пушку», представляющую собой вертикальную закрытую снизу латунную трубку, закрепленную на валу электродвигателя, нужно налить немного летучей жидкости – эфира, и заткнуть трубку пробкой (для большей эффективности опыта и для удобства наблюдения в пробку можно воткнуть птичье перо). Затем нужно включить двигатель и тормозить вращение трубки специальным деревянным зажимом, выполненным в виде щипцов с выточенным в них цилиндрическим пазом, соответствующим диаметру трубки (рис. 3.1). При этом механическая работа электродвигателя, совершаемая против сил трения в зажиме, будет превращаться в теплоту, трубка нагреется, эфир в ней испарится и через некоторое время после начала показа опыта вышибет пробку, в результате чего она взлетит вверх на высоту нескольких метров.



Рис. 3.1. Опыт Тиндаля.

3.1.2. Ковка свинца на наковальне.

Для демонстрации превращения работы в теплоту показывается нагревание куска свинца при его ковке на наковальне. Повышение

¹ Дж. Тиндаль (1820 – 1893) – английский физик, член Лондонского королевского общества, выдающийся лектор и популяризатор науки.

температуры свинца регистрируют при помощи газового термометра, выполненного на основе U-образного манометра. Одно из колен этого манометра сообщается с атмосферой, а второе снабжено воронкой, широкая часть которой герметично закрыта тонкой медной крышечкой. Эта воронка является рабочим элементом газового термометра. У основания воронки на стеклянной трубке манометра имеется оттяжка с надетым на нее куском шланга, служащая для уравнивания давлений в коленях манометра. После приведения манометра в рабочее состояние шланг перекрывается при помощи зажима, в результате чего объем воздуха, находящийся в колене с воронкой над жидкостью, оказывается отсеченным от атмосферы и служит термометрическим телом. Ковка свинца проводится тяжелым молотком на наковальне со вставкой из гетинакса, служащей для теплоизоляции. Свинец, во избежание его нагревания от рук, удерживается при помощи пассатижей.

Вначале кусок свинца нужно положить на рабочий элемент газового термометра, показывая, что разность давлений в коленях манометра отсутствует, то есть свинец имеет комнатную температуру. Затем при помощи пассатижей нужно аккуратно снять свинец с рабочего элемента газового термометра, поместить свинец на наковальню и, продолжая удерживать его пассатижами, наносить по нему сильные частые удары молотком в течение 30-40 секунд. После этого сразу же положить свинец обратно на рабочий элемент газового термометра и наблюдать изменение уровней жидкости в коленях манометра, свидетельствующее о том, что свинец в процессе ковки нагрелся (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Нагревание свинца после ковки на наковальне.

Последнее можно доказать, сняв свинец с термометра и приложив к рабочему элементу руку. При этом жидкость в манометре начнет двигаться в ту же сторону, что и после прикладывания к рабочему элементу кованого свинца. После окончания демонстрации зажим на шланге термометра нужно открыть.

При ковке свинца необходимо соблюдать осторожность и следить, чтобы молоток не слетел с ручки и не нанес травму зрителям.

3.1.3. Нагревание газа при адиабатическом сжатии («воздушное огниво»).

Прибор представляет собой прозрачный полированный цилиндр из оргстекла, вдоль оси которого просверлен канал так, что один из концов канала открыт, а другой оканчивается внутри цилиндра (рис. 3.3). К цилиндру прилагается поршень, на одном конце которого сделано утолщение в виде резиновой шайбы, поджатой гайкой, так что поршень плотно входит в канал. Другой конец поршня снабжен ручкой.



Рис. 3.3.
Воздушное огниво.



Рис. 3.4. Демонстрация вспышки
эфира в воздушном огниве.

Для показа демонстрации нужно капнуть из пипетки две-три капли серного эфира в канал и помахать цилиндром в воздухе, чтобы горючая смесь заполнила весь канал. Затем поставить цилиндр на стол таким образом, чтобы открытый конец канала оказался сверху, вставить поршень в канал так, чтобы утолщение оказалось в самом начале канала, и частично погасить свет в аудитории. Далее, удерживая цилиндр одной рукой, резко ударить другой рукой по ручке поршня. После удара в нижней глухой части канала должна наблюдаться вспышка (рис. 3.4). Если этого не произошло, то нужно вынуть поршень из канала, снова помахать цилиндром в воздухе, чтобы эфир лучше испарился и в канал попал воздух, и затем повторить опыт. Опыт повторяют несколько раз (в том числе при совсем выключенном освещении), не добавляя эфир, а лишь вынимая поршень и проветривая цилиндр.

Наблюдаемое явление объясняется тем, что при ударе по поршню объем горючей смеси быстро уменьшается в несколько десятков раз. Так как время, за которое происходит это уменьшение, мало, то смесь не успевает обменяться теплотой с цилиндром и с окружающей средой, то есть процесс сжатия проходит адиабатически. Вследствие этого температура смеси быстро возрастает, и она воспламеняется, что фиксируется по яркой вспышке. При этом кажется, что воспламенение паровоздушной смеси происходит как бы само собой, без каких-либо внешних источников огня или искры, то есть огонь получается «из воздуха». Поэтому данное устройство получило название «воздушное огниво». При демонстрации опыта можно пояснить, что на аналогичном принципе основана работа дизельного двигателя, но в нем, в отличие от «огнива», впрыск топлива осуществляется после быстрого сжатия воздуха, приводящего к его нагреву.

3.2. Превращение теплоты в работу (водяная «пушка»).

Водяная «пушка» представляет собой дюралюминиевый или латунный цилиндр, вдоль оси которого высверлен достаточно длинный цилиндрический канал, открытый на одном из торцов цилиндра. Диаметр этого канала на 3–4 мм меньше, чем внешний диаметр цилиндра. «Пушка» при помощи проволочного держателя

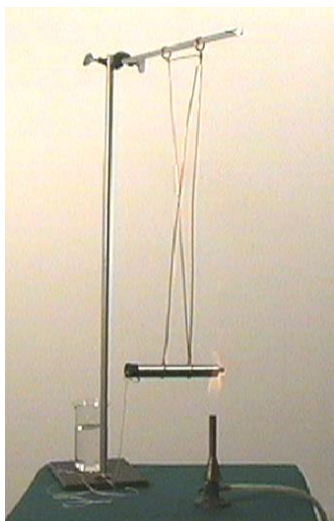


Рис. 3.5. Водяная «пушка».

и металлического стержня с наконечником подвешивается на штативе в слегка наклонном положении, в нее заливается вода, и канал затыкается резиновой пробкой (рис. 3.5). Стержень должен быть закреплен таким образом, чтобы его наконечник не позволял подвесу «пушки» соскакивать со стержня, а сама «пушка» располагалась параллельно зрителям на высоте ~20 см над поверхностью демонстрационного стола. Висящая «пушка» должна быть наклонена под небольшим углом к горизонту с тем, чтобы налитая в нее вода скапливалась в глухой части канала. К пробке для удобства ее отыскания после показа опыта можно привязать длин-

ную нитку, второй конец которой крепится к штативу. На стол перед «пушкой» ставится пенопластовая или картонная преграда с таким расчетом, чтобы вылетающая из «пушки» резиновая пробка могла ее сбить.

При показе демонстрации нужно залить в «пушку» $\sim 2 \div 3$ мл воды, как можно плотнее заткнуть «жерло» пробкой, остановить «пушку» в положении равновесия, чтобы она не качалась, зажечь горелку и пододвинуть ее под «пушку». Отрегулировать положение горелки так, чтобы верхняя треть ее пламени подогревала казенную часть «пушки», где находится вода. Вскоре вода в «пушке» закипит и превратится в пар, давление которого при дальнейшем нагревании сильно повысится, и через 1-2 минуты пробка вылетит из «пушки» – она выстрелит, и вылетевшая пробка собьет преграду. Таким образом, теплота, полученная паром от горелки, превратится в механическую работу, в результате чего пробка приобретет кинетическую энергию.

При проведении опыта в «пушку» не следует заливать большое количество воды – она от этого начинает хуже стрелять. Нельзя направлять «пушку» на зрителей. После того, как «пушка» выстрелила, в течение некоторого времени к ней не следует прикасаться во избежание ожога. Если после показа демонстрации ее требуется немедленно повторить или убрать со стола, то «пушку» можно брать, только надев на руку плотную перчатку.

3.3. Измерение показателя адиабаты у газов методом Рухардта².

Прибор Рухардта, предназначенный для измерения показателя адиабаты у газов, устроен следующим образом [9] (см. рис. 3.6). Стеклянная бутылка объемом ~ 10 литров установлена на подставке. В ее нижней части имеется патрубок с небольшим отверстием для подвода газа. Газ в бутылку подается по шлангу от воздуходувки либо от баллона со сжатым газом через редуктор. На шланге установлен регулировочный зажим, а также противопылевой фильтр. В горловину бутылки через резиновую пробку вставлена вертикальная стеклянная трубка длиной ~ 35 см. Внутри нее находится цилиндр из дюралюминия диаметром ~ 10 мм и массой ~ 5 г с проточками на боковой поверхности. В средней части трубки имеется узкий пропилен размерами $0,5 \times 1,5$ мм. На трубку вблизи пропила надевается пластмассовое

² Е. Рухардт – немецкий физик; метод измерения γ предложен в 1929 г.



Рис. 3.6. Прибор
Рухардта.

колечко, передвижением которого регулируется отток газа из бутылки. Сверху трубка прикреплена к вертикальной стойке при помощи специального наконечника с отверстиями. Этот наконечник предотвращает выброс цилиндра из трубки в случае резкого повышения давления в бутылке, а при смещении вниз может закрывать трубку. К стойке также крепится подключаемый к компьютеру фотодатчик, служащий для точного определения периода колебаний цилиндра, знание которого необходимо для измерения показателя адиабаты у разных газов. Прибор комплектуется барометром-анероидом.

При подаче в бутылку газа через патрубков давление в ней возрастает, и цилиндр начинает двигаться по трубке вверх. После того, как цилиндр проходит мимо пропила в трубке, излишки газа выходят из бутылки. При дальней-

шем движении цилиндра вверх (по инерции) давление в бутылке падает, и цилиндр опускается вниз, перекрывая пропил, после чего давление в бутылке вновь начинает расти, и далее весь процесс повторяется. Подбирая давление подаваемого в бутылку газа и манипулируя зажимом на шланге и колечком на трубке, можно добиться установления симметричных автоколебаний цилиндра в трубке вблизи места пропила. Можно показать, что эти автоколебания ввиду малости потерь энергии за период колебаний близки к гармоническим колебаниям.

В Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова была создана компьютерная программа, позволяющая в автоматическом режиме измерять период T автоколебаний в приборе Рухардта и затем рассчитывать показатель адиабаты γ у различных газов. Программа позволяет задавать значения массы цилиндра m , объема бутылки V , диаметра цилиндра d , длины трубки l , атмосферного давления p_0 и абсолютных погрешностей всех этих величин. Показатель адиабаты может быть рассчитан при помощи простой формулы, полученной Рухардтом:

$$\gamma = \frac{64m(V + Sl)}{pd^4T^2}, \text{ где } p = p_0 + mg/S, S = \pi d^2/4.$$

Автоматизированный демонстрационный эксперимент по измерению показателя адиабаты осуществляется следующим образом. После запуска программы при выборе пункта меню «Измерения» можно задать с помощью клавиатуры компьютера число серий измерения периода автоколебаний (в пределах от 3 до 15) и количество периодов в каждой серии (в пределах от 3 до 50). Затем (при включенной установке) начинаются измерения – измеряется время, в течение которого происходит заданное количество периодов автоколебаний в каждой серии, и для каждой серии измерений определяется период автоколебаний. Далее происходит усреднение измеренных периодов по всем сериям и вычисляется величина стандартного отклонения периода от найденного среднего значения, после чего вычисляется величина показателя адиабаты для находящегося в установке газа и оценивается ее погрешность. Так как характерный период автоколебаний цилиндра в установке составляет ~ 1 с, то при проведении 5 серий измерений, включающих в себя по 5 периодов, время определения показателя адиабаты составляет ~ 30 секунд. После проведения измерений показателя адиабаты можно перейти в режим моделирования автоколебаний, который также реализован в программе, и, задав в качестве параметра полученное экспериментально значение показателя адиабаты, убедиться, что рассчитываемая при моделировании величина T_0 периода автоколебаний в пределах погрешностей измерений согласуется с экспериментально определенным периодом T .

С использованием данной установки можно измерять показатель адиабаты как у атмосферного воздуха, так и у ряда других газов, использование которых разрешено для целей учебного процесса. Это, прежде всего, аргон и углекислый газ. Проведенные измерения дают для показателя адиабаты γ этих газов следующие значения: воздух – $\gamma = 1,407 \pm 0,005$; аргон – $\gamma = 1,636 \pm 0,005$; углекислый газ – $\gamma = 1,303 \pm 0,005$.

Следует отметить, что в описываемых демонстрационных экспериментах период автоколебаний измеряется с точностью не хуже $\sim 0,1\%$; при этом точность определения показателя адиабаты составляет $\sim 0,5\%$ (увеличение погрешности связано с наличием ошибок в измерении величин, входящих, помимо периода, в расчетную формулу для γ). Такая точность измерений позволяет не

только надежно различать одноатомные, двухатомные и многоатомные газы, но и отличать сухой атмосферный воздух от влажного (в частности, в зависимости от времени года при измерении показателя адиабаты у атмосферного воздуха получаются результаты, различающиеся примерно на 0,010).

Прибор используется также при чтении раздела «Механика» курса общей физики (см. книгу «Механика. Лекционный эксперимент» [17], демонстрация 6.4.12).

3.4. Вихревая трубка Ранке и Хильша³.

Демонстрируется устройство, которое можно назвать (конечно, в шутку) «демоном Максвелла», разделяющим быстрые («горячие») и медленные («холодные») молекулы.



Рис. 3.7. Вихревая трубка Ранке и Хильша.

Вихревая трубка Ранке и Хильша, которая применяется в современном холодильном и нагревательном оборудовании, устроена следующим образом (рис. 3.7). В длинную цилиндрическую трубку через отросток, припаянный недалеко от одного из ее концов перпендикулярно образующей цилиндра и по касательной к его поперечному сечению, подается от компрессора сжатый воздух под давлением 6÷8 атмосфер. Внутри трубки около отростка имеется цилиндрическая вставка с небольшим отверстием на оси, расположенная со стороны короткого конца трубки. Воздух, двигаясь в трубке, быстро вращается вокруг ее оси, образуя вихрь, и через отверстие во вставке из короткой части трубки выходит воздух из

³ Дж. Ранке (1898 – 1973) – французский инженер, в 1931 г. подал заявку на патентование изобретенной им в конце 20-х годов XX в. «вихревой трубки»; Р. Хильш (1903 – 1972) – немецкий физик, в 1946 г. на основе проведенных экспериментальных исследований дал практические рекомендации по конструированию таких вихревых трубок.

приосевой части этого вихря, а из другого (длинного) конца трубки через регулировочный вентиль выходит воздух, который вращается около стенок трубки. Температуры обоих потоков воздуха измеряются при помощи термодпар цифровым термометром (рис. 3.8), и оказывается, что один (приосевой) поток – холодный (температура ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), а другой – горячий (температура выше $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Рис. 3.8. Измерение температуры потоков воздуха на выходе из вихревой трубки.

Законченной и непротиворечивой теории процессов, происходящих в вихревой трубке, до сих пор не существует. Одно из часто приводимых и наиболее простых объяснений наблюдаемого явления состоит в том, что при раскручивании газа в вихревой трубке он под действием центробежных сил адиабатически сжимается у стенок трубки, в результате чего нагревается; в приосевой же зоне трубки, наоборот, газ испытывает разрежение, и тут он, адиабатически расширяясь, охлаждается.

3.5. Основы работы тепловых двигателей.

3.5.1. Опыт В. К. Аркадьева⁴.

Периодичность изменения состояния рабочего вещества теплового двигателя при его циклической работе, а также необходимость для работы тепловой машины нагревателя и холодильника можно проиллюстрировать при помощи следующего простого опыта, предложенного В. К. Аркадьевым. Вблизи центральной части дна плоскопараллельной стеклянной кюветы помещают электронагреватель, изготовленный из нихромовой спирали. Изолированные достаточно толстые медные провода для подвода к спирали электрического тока располагают, изогнув, вдоль стенок и дна кюветы, чтобы они не мешали наблюдению. Содержимое кюветы демонстрируется на экране аудитории в проекции (с помощью проекционного фонаря либо видеокамеры и проектора).

⁴ В. К. Аркадьев (1884 – 1953) – русский и советский физик, член-корреспондент Академии наук СССР, профессор НИИФ МГУ.

В кювету наливают холодную воду (почти до краев) и бросают на спираль несколько кристаллов марганцовокислого калия. Для того чтобы тонущие кристаллы раньше времени не окрасили воду в кювете, используют вертикальную стеклянную трубочку. Ее вертикально опускают в кювету так, чтобы нижний конец трубочки упирался в спираль, бросают в трубочку кристаллы, а затем, заткнув верхний конец трубочки пальцем, вынимают ее из кюветы вместе с окрасившейся при падении кристаллов водой.

При пропускании через электронагреватель постоянного тока силой ~ 1 А вода вблизи спирали начинает нагреваться и подниматься вверх, образуя в центральной части кюветы восходящий поток. Нагретая вода доходит до верхней части кюветы, охлаждается, рас-

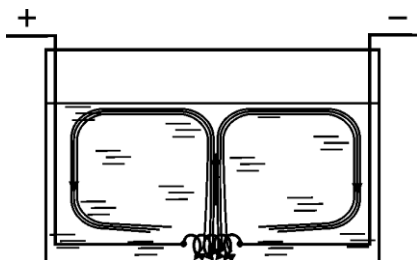


Рис. 3.9. Опыт В. К. Аркадьева.

ходит в разные стороны к стенкам кюветы и опускается вдоль них ко дну, образуя нисходящие потоки (рис. 3.9). Возникающую циркуляцию жидкости можно наблюдать благодаря постепенному растворению кристаллов, которые окрашивают водные потоки.

3.5.2. Кипение хлороформа под водой.

Демонстрация позволяет показать, что можно осуществить непрерывно действующую тепловую машину при наличии одной лишь только разности температур, без каких-либо механических конструкций.

На дно плоскопараллельной стеклянной кюветы высотой $\sim 20 \div 25$ см наливают слой подкрашенного йодом хлороформа до высоты $\sim 2,5 \div 3,0$ см, после чего кювету аккуратно доливают доверху холодной дистиллированной водой. Вблизи дна кюветы помещают электронагреватель — в точности такой и таким же образом, как при показе опыта В. К. Аркадьева (см. демонстрацию 3.5.1). Содержимое кюветы демонстрируется на экране аудитории в проекции.

После включения электрического тока, питающего нагреватель, хлороформ вблизи спирали закипает (температура его кипения $+61^\circ\text{C}$). Пузырьки испарившегося хлороформа всплывают вверх, попадают в воду, и на границе раздела хлороформа и воды захватывают капли хлороформа, увлекая их за собой. Эти капли висят на пузырьках пара, имея вытянутую форму, поскольку хлороформ тяжелее воды.

При попадании в верхние холодные слои воды пузырьки пара охлаждаются, их объем уменьшается, вследствие этого уменьшается действующая на них подъемная сила, и капли с пузырьками начинают тонуть. В результате во время показа опыта капли хлороформа с пузырьками пара всё время движутся в кювете вверх и вниз, что может служить моделью работы теплового двигателя.

3.6. Модели тепловых двигателей.

3.6.1. Паровая машина.

Паровая машина – устройство, позволяющее преобразовывать внутреннюю энергию нагретого пара в механическую работу. Она относится к двигателям внешнего сгорания, то есть к таким двигателям, в которых топливо сжигается снаружи, вне корпуса двигателя (например, в специальной топке). Модель паровой машины, имеющаяся в Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, устроена следующим образом (рис. 3.10).

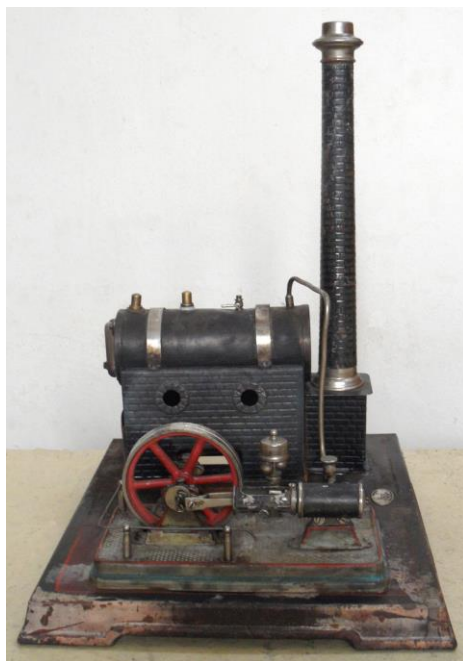


Рис. 3.10. Паровая машина.

Над топкой, в которую помещается спиртовка или газовая горелка, укреплен цилиндрический металлический котел, в верхней части которого имеется заворачивающееся отверстие для заливания воды и ручной клапан для стравливания излишков пара, а сбоку подсоединена мерная трубка для контроля уровня воды. Из верхней части котла выходит тонкая металлическая трубка-паропровод, снабженная еще одним ручным регулировочным клапаном, по которой пар подается в центральную часть рабочего цилиндра. В цилиндре находится поршень, соединенный через выходящий из цилиндра шток с ползуном, который обеспечивает возвратно-поступательное движение поршня. К ползуну с другой стороны прикреплен качающийся шатун, который через кривошип приводит во вращение маховик машины. Другой кривошипно-шатунный механизм приводит в действие систему парораспределения, благодаря которой свежий пар из паропровода поочередно подается в обе стороны рабочего цилиндра, в то время как отработанный пар с другой стороны цилиндра выходит в атмосферу. Такая машина называется паровой машиной двойного действия. Из-за того, что у рассматриваемой машины есть всего один рабочий цилиндр, у маховика имеются так называемые мертвые точки – они соответствуют крайним положениям поршня в цилиндре и нулевому моменту сил, создаваемому шатуном.

Перед показом демонстрации рекомендуется смазать машинным маслом все движущиеся части машины. Затем необходимо при помощи мерного шприца залить в котел необходимое количество воды, контролируя ее уровень по водомерной трубке. После этого нужно завинтить заливочное отверстие специальной резьбовой пробкой, установить клапаны в положение, обеспечивающее герметизацию котла и паропровода, и начать нагревать воду в котле. После закипания воды в котле (это определяется по характерному шуму и по начавшему выходить из цилиндра пару) нужно попробовать запустить машину – подтолкнуть маховик, придав ему вращение в любом направлении (при этом нужно следить, чтобы маховик не останавливался в мертвых точках). После нескольких попыток запуска машина начнет работать – маховик будет постепенно раскручиваться, набрав, в конце концов, значительные обороты. Для регулировки частоты вращения маховика можно пользоваться ручным клапаном на паропроводе. Для того чтобы остановить машину, нужно открыть ручной клапан на котле и прекратить нагревать котел.

Во время показа демонстрации нужно проявлять осторожность, чтобы не обжечься паром.

3.6.2. Двигатель Стирлинга⁵.

Примером еще одного двигателя внешнего сгорания является двигатель Стирлинга, цикл которого состоит из двух изотерм и двух изохор. Конструктивно двигатель состоит из двух заполненных воздухом цилиндров, сообщающихся друг с другом – большого, который играет роль теплообменника, и малого, который является рабочим. Один конец теплообменника подогревается газовой горелкой, второй поддерживается при комнатной температуре. В цилиндре-теплообменнике движется большой поршень, диаметр которого несколько меньше внутреннего диаметра теплообменника. Этот поршень выполнен из теплоизолирующего материала и играет роль клапана, перегоняющего воздух то к холодному, то к горячему торцу теплообменника (воздух движется в зазорах между поршнем и стенками цилиндра). В рабочем цилиндре движется малый поршень, который плотно подогнан к рабочему цилиндру. Суммарный объем воздуха в цилиндрах фиксирован. Поршни при помощи двух кривошипно-шатунных механизмов соединены с маховиком и при его вращении движутся со сдвигом по фазе $\sim 90^\circ$. Благодаря этому четыре мертвые точки, имеющиеся у этого двухцилиндрового двигателя, проходятся поршнями с таким же сдвигом по фазе. Поэтому в течение времени, когда один из поршней находится вблизи какой-либо мертвой точки и практически не движется, другой поршень может совершать значительные перемещения.

При работе двигателя большой поршень сначала располагается вблизи одной из своих мертвых точек, а рабочее тело (воздух) находится вблизи холодного торца теплообменника. Малый поршень при этом движется, сжимая воздух и вытесняя его из рабочего цилиндра (это первый такт работы двигателя). Давление воздуха при этом возрастает, а его температура остается постоянной благодаря отводу от воздуха теплоты в окружающую среду.

К концу первого такта малый поршень полностью вытесняет воздух из рабочего цилиндра и практически останавливается вблизи одной из своих мертвых точек. При этом начинает двигаться большой поршень, который перегоняет воздух к нагретому торцу теплообменника. В результате воздух нагревается при постоянном объеме и его давление возрастает (второй такт работы двигателя).

⁵ Р. Стирлинг (1790 – 1878) – шотландский священник, изобрел двигатель, позже названный его именем (запатентован в 1816 г.).

К концу второго такта большой поршень оказывается вблизи своей второй мертвой точки. Разогревшийся к этому моменту воздух начинает расширяться при постоянной температуре, толкая малый поршень (третий такт, который является рабочим). При этом давление воздуха в обоих цилиндрах падает, а в результате перемещения малого поршня происходит совершение полезной работы (раскручивается маховик).

К концу третьего такта малый поршень оказывается вблизи своей второй мертвой точки и практически не движется. Большой же поршень снова начинает двигаться и перегоняет воздух к холодному торцу теплообменника. В результате газ охлаждается при постоянном объеме и его давление падает (четвертый такт). К концу этого такта воздух находится вблизи холодного торца теплообменника и полностью заполняет рабочий цилиндр, то есть рабочее тело возвращается в свое исходное состояние.

Следует отметить, что на практике четыре описанных цикла работы двигателя плавно сменяют друг друга ввиду отсутствия в нем клапанов, что резко упрощает конструкцию двигателя.

Двигатели Стирлинга имеют сравнительно немного движущихся деталей, большой диапазон мощностей, начиная от самых малых, мало зависящий от скорости вращения крутящий момент, высокий КПД (до 70% от КПД цикла Карно), допускают использование любых источников теплоты, могут иметь малотоксичный выхлоп (или вообще не иметь его, например, при использовании для нагревания теплообменника солнечной энергии). Поэтому в настоящее время эти двигатели применяются все шире, в том числе и на космических аппаратах. К недостаткам двигателя относятся сравнительно большие габариты по сравнению с двигателями

внутреннего сгорания (при заданной мощности), невозможность самозапуска, а также высокие требования, предъявляемые к материалам, применяющимся при изготовлении деталей двигателя, и к технологиям создания этих деталей.

Для демонстрации двигателя Стирлинга необходимо поставить его на

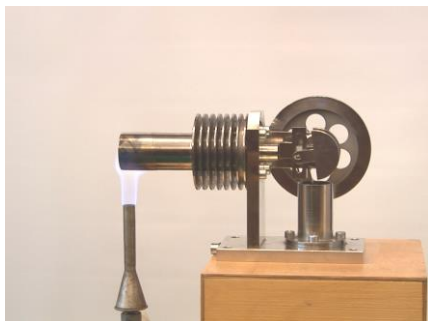


Рис. 3.11. Двигатель Стирлинга.

подставку (например, деревянный кубик). Затем нужно зажечь газовую горелку и подставить ее под большой цилиндр-теплообменник так, чтобы верхняя треть пламени горелки нагревала его конец (рис. 3.11). Через 15-20 секунд после начала нагревания нужно, удерживая основание двигателя одной рукой, второй рукой начать прокручивать маховик двигателя, пытаясь запустить его (это необходимо, поскольку устойчивому положению маховика соответствует нахождение одного из цилиндров в какой-либо из мертвых точек; именно по этой причине самостоятельный запуск двигателя невозможен). После нескольких попыток запуска маховик начнет вращаться самостоятельно, постепенно набирая обороты. Если погасить горелку, то скорость вращения маховика начнет уменьшаться, и вскоре двигатель остановится.

При показе опыта следует соблюдать осторожность – нельзя перегревать цилиндр-теплообменник, во избежание ожогов запрещается прикасаться к нагретому цилиндру руками.

3.6.3. Колесо с резиновыми спицами.

Демонстрируется модель теплового двигателя – велосипедное колесо, у которого удалены средние части спиц. Оставшиеся куски спиц длиной ~ 5 см загнуты в виде крючков, на которые натянуты резиновые кольца, вырезанные из мотоциклетной камеры. Для увеличения теплоотдачи каждая «спица» сделана из двух резинок шириной около 5 мм каждая. Ось получившегося колеса с резиновыми «спицами» удлинена при помощи металлической насадки длиной около 15 см, которая служит для крепления колеса на штативе.

Для демонстрации нужно закрепить колесо на штативе так, чтобы ось колеса была горизонтальна и направлена в сторону аудитории, и отбалансировать колесо до состояния безразличного равновесия при помощи кусочков пластилина, прилепляя их к ободу. Балансировку колеса нужно проверять непосредственно перед показом демонстрации. Затем следует установить на другом штативе лампу накаливания (~ 220 В/500 Вт) с рефлектором, укрепив ее при помощи специального держателя на уровне оси колеса слева или справа от нее так, чтобы расстояние от лампы до резиновых «спиц» составляло $\sim 15\div 20$ см, а ее свет был направлен в сторону, противоположную зрителям. После включения лампы она начинает нагревать резиновые спицы, в результате чего они сжимаются.

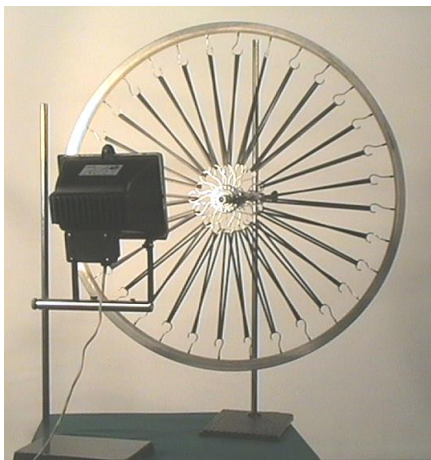


Рис. 3.12.

Модель теплового двигателя –
колесо с резиновыми спицами.

При нагревании «спиц» на левой половине колеса сжимающаяся резина смещает центр масс обода колеса вправо от оси (рис. 3.12). Под действием возникшего момента силы тяжести колесо начинает вращаться по часовой стрелке. Скорость вращения зависит от скорости отдачи теплоты в окружающую среду резинками, находящимися справа. При нагревании же резиновых спиц справа от оси колеса направление его вращения меняется – оно начинает крутиться против

часовой стрелки. Таким образом, нагревателем в данной тепловой машине является лампа, роль холодильника играет окружающий колесо воздух, а рабочим телом являются резиновые «спицы».

Расстояние от лампы до «спиц» должно быть подобрано таким образом, чтобы за время одного оборота резинки успевали охлаждаться. В противном случае вращение колеса становится неравномерным – колесо то ускоряется, то замедляется и может даже ненадолго приостанавливаться и вращаться в другую сторону. Нельзя ставить лампу на расстоянии ближе 10 см от «спиц», так как это может привести к их быстрой порче из-за перегрева. Хранить колесо следует в горизонтальном положении, подвешивая его за конец оси. Лопнувшие резиновые «спицы» необходимо своевременно заменять.

3.6.4. Колесо с ферромагнитными спицами.

Демонстрацию, внешне очень похожую на предыдущую, но основанную на другом физическом явлении, можно показать при помощи колеса с ферромагнитными спицами, которое устроено следующим образом.

Спицы длиной ~12-15 см, нарезанные из железной проволоки диаметром около 1 мм, вставлены в боковую поверхность цилиндрического основания диаметром около 2-3 см и толщиной 3-4 мм. Спицы располагаются симметрично, в центре основания сделано

небольшое углубление для игольчатой опоры, на которую кладется получившееся колесо. Оно должно быть сбалансировано и находиться на опоре в равновесии в горизонтальном положении. Рядом с колесом на предметный столик кладется сильный постоянный полосовой магнит, обращенный одним полюсом в сторону колеса. Магнит должен располагаться на одной высоте с колесом, расстояние между полюсом магнита и концами ближних к нему спиц колеса должно составлять около 2-3 см. Для показа демонстрации используется газовая горелка, которая должна давать широкое пламя.

После зажигания горелки ее нужно расположить так, чтобы пламя нагревало концы нескольких спиц вблизи полюса магнита (рис. 3.13). Греть нужно немного сбоку, чтобы нагревалась только часть спиц из числа тех, которые в данный момент притягиваются к магниту. Через несколько секунд железо раскалится докрасна, магнитные свойства у железа практически исчезнут (оно нагреется выше температуры Кюри и перейдет из ферромагнитного состояния в парамагнитное), и в результате нагретые спицы перестанут притягиваться к магниту. Спицы же, которые не нагреваются горелкой, но также находятся вблизи полюса магнита, будут по-прежнему притягиваться к нему. В результате колесо начнет поворачиваться – оно будет вращаться в сторону горелки. При этом нагретые спицы будут выходить из пламени горелки, и остывать, возвращая свои магнитные свойства, а в пламя будут попадать новые спицы, которые при нагревании, в свою очередь, будут терять магнитные свойства. Подбирая расстояние между магнитом и спицами и степень их нагревания, можно добиться, чтобы вращение колеса было непрерывным – в результате получится модель теплового двигателя.

При показе опыта нельзя трогать колесо руками сразу после нагревания горелкой – можно сильно обжечься.

Прибор используется также при чтении раздела «Электричество и магнетизм» курса общей физики.



Рис. 3.13. Модель теплового двигателя – колесо с ферромагнитными спицами.

3.6.5. «Термомобиль».

Демонстрируется простая модель теплового двигателя, использующая в качестве рабочего тела нитиноловую проволоку – сплав никеля с титаном, обладающий так называемой «памятью формы». Из этого сплава сделано проволочное кольцо, накинутое на два ролика, укрепленных на пластиковом держателе – латунный (внизу) и пластмассовый (наверху). Нижний ролик, имеющий малый диаметр, погружают в горячую воду – нагреватель, имеющий температуру около $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Верхний ролик большего диаметра – холодильник, находится при комнатной температуре (рис. 3.14). После нагревания в горячей воде проволока около нижнего ролика в результате фазового перехода «вспоминает» свою форму, которая

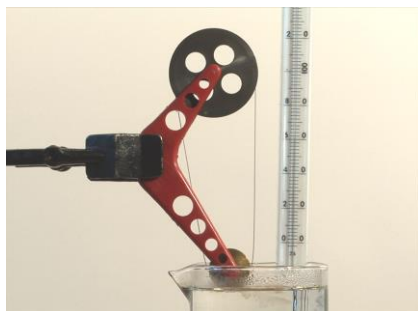


Рис. 3.14. Термомобиль.

была ей придана когда-то при закалке, стремится выпрямиться, и в результате возникает момент сил, который начинает вращать ролики. Доходя до верхнего ролика, нитинол остывает и испытывает обратный фазовый переход. Двигатель работает до тех пор, пока между роликами существует разность температур, достаточная для данного фазового перехода.

Следует отметить, что сплавы с памятью формы в настоящее время широко применяются в технике.

При показе демонстрации нельзя использовать слишком горячую воду, поскольку это может привести к перегреву нитинолового кольца и его порче.

3.6.6. Китайский «гусь» («пьющая утка»).

Демонстрационный прибор, иллюстрирующий работу теплового двигателя, выполнен в виде птицы. Он состоит из стеклянной колбочки (туловище «гуся»), в которую налит подкрашенный эфир, и впаянной в нее трубочки-шеи, которая соединяет туловище «гуся» с его стеклянной головой. Нижний конец трубочки немного не достает до дна колбочки. Вся эта система герметична, воздух изнутри «гуся» откачан, а над поверхностью жидкого эфира находится его насыщенный пар. К шее «гуся» прикреплена ось, опирающаяся на

сделанные из пластмассы «ноги», так что центр тяжести системы находится чуть ниже точки опоры (см. рис. 3.15). Благодаря этому «гусь» может совершать колебания вокруг этой оси. На голову и клюв «гуся» наклеен слой ткани. Вся система установлена на пластмассовой подставке. Перед «гусем» закреплена съемная чашечка, в которую может наливаться вода.

При показе демонстрации нужно наклонить голову «гуся» к чашечке и аккуратно смочить водой из стакана ткань, которой обклеены голова и клюв «гуся». При этом вода должна пропитать всю ткань, а чашечка наполниться почти до краев. Затем нужно вернуть «гуся» в исходное положение и слегка подогреть нижнюю часть колбочки с эфиром, взявшись за нее пальцами. Во время нагревания столбик эфира в трубке будет подниматься. Нагрев нужно прекратить, когда столбик эфира поднимется до головы «гуся». Примерно через 10–15 секунд после этого устройство начнет работать – «гусь» сам наклонится к чашечке, «попьет воды», после чего начнутся его колебания вокруг положения равновесия, в ходе которых «гусь» будет все больше и больше наклоняться к чашечке до тех пор, пока его клюв вновь не погрузится в воду. Далее этот процесс будет повторяться – тепловой двигатель начнет работать. Дождавшись, пока колебания «гуся» установятся, нужно вылить воду из чашечки и вернуть ее на прежнее место. Колебания будут продолжаться с прежней частотой, и «гусь» будет «пить» из уже пустой чашки. Если, придерживая «гуся» рукой, налить из пипетки на ткань эфир или спирт, набранный из пузырька, то после этого «гусь» начнет колебаться значительно быстрее и будет чаще «пить» из по-прежнему пустой чашки.

Описанные явления объясняются тем, что при колебаниях «гуся» его голова охлаждается за счет испарения воды, которой пропитана влажная ткань. Вследствие этого пары эфира в голове конденсируются, давление внутри нее падает, и жидкий эфир через трубочку засасывается из туловища в голову. Когда эфир поднимается по



Рис. 3.15. «Пьющая утка».

трубочке достаточно высоко, центр масс «гуся» смещается вверх, и он наклоняется к чашечке, чтобы «попить». При этом клюв «гуся» окунается в воду, в результате чего ткань на голове «гуся» все время поддерживается влажной. Но, когда «гусь» принимает горизонтальное положение, происходит пробулькивание паров эфира из туловища в голову. При этом эфир перетекает из головы обратно в туловище, центр масс вновь опускается, и «гусь» снова начинает колебаться. Двигатель работает до тех пор, пока голова «гуся» остается мокрой. Колебания прекратятся только тогда, когда «гусь» «выпьет» из чашки всю воду, и ткань на его голове высохнет. Поэтому «гусь» в течение некоторого времени может «пить» воду и из пустой чашечки. Наливание на ткань эфира или спирта делает процесс испарения более интенсивным и ускоряет охлаждение головы «гуся», вследствие чего эфир засасывается из туловища в голову быстрее, что и приводит к увеличению частоты колебаний.

Определяющую роль в работе данного устройства играет испарение жидкости с ткани, которой оклеены голова и клюв «гуся». Если испарение отсутствует, что может наблюдаться при стопроцентной влажности окружающего воздуха, то двигатель работать не будет. Это можно продемонстрировать, накрыв пьющего «гуся» герметичным стеклянным колпаком. Через некоторое время после этого водяной пар под колпаком станет насыщенным, и тепловой двигатель перестанет работать.

Модель вследствие малости ее размеров рекомендуется показывать в видеопроекции. Данный эксперимент также можно демонстрировать в качестве примера автоколебательной системы при чтении раздела «Механика» курса общей физики (см. книгу «Механика. Лекционный эксперимент» [17], демонстрация **6.4.13**).

3.6.7. Опыт Дарлингга⁶.

Демонстрируется модель, показывающая возможность циклического преобразования теплоты в работу. В высокий стеклянный стакан наливается вода, в которую затем добавляется анилин так, чтобы на дне стакана образовался анилиновый слой толщиной 1-2 см. Стакан нагревается на мощной электрической плитке или на газовой горелке, снабженной рассекателем пламени (его можно заменить огнеупорной прокладкой). Анилин не смешивается с водой и

⁶ См., напр., книгу: Ч. Р. Дарлинг. Капли, их образование и движение. Три популярные лекции. – Изд-во Академии наук СССР, М.–Л., 1937.

имеет плотность немного большую, чем вода, поэтому изначально он находится внизу. При нагревании плотность анилина уменьшается, и его крупные капли всплывают на поверхность воды (см. рис. 3.16). Через некоторое время они охлаждаются за счет теплообмена с верхними непрогретыми слоями воды и опускаются вниз, после чего



Рис. 3.16. Опыт Дарлингга.

через некоторое время процесс повторяется. Циклическое всплывание и опускание анилина будет происходить до тех пор, пока вода в стакане не прогреется вдоль всей его высоты до достаточно высокой температуры. В этой модели рабочим телом двигателя является подкрашенный анилин, нагревателем – электроплитка, а холодильником – окружающая среда, которой отдается теплота от верхней поверхности жидкости в стакане, куда налита вода.

Демонстрация используется также при чтении раздела «Механика» курса общей физики в качестве примера автоколебательной системы (см. книгу «Механика. Лекционный эксперимент» [17], демонстрация **6.4.14**).

3.6.8. Модифицированный опыт Дарлингга.

Прибор выполнен заводским способом в виде декоративной настольной лампы в форме ракеты и состоит из трех отдельных частей. Основная деталь представляет собой вытянутый герметично закрытый стеклянный сосуд высотой около 30 см, заполненный прозрачной бесцветной жидкостью. Сосуд вставляется в подставку, внутри которой имеется лампа накаливания мощностью 30 Вт, нагревающая и подсвечивающая дно сосуда. Металлическая крышка сосуда для улучшения теплоотдачи покрашена в черный цвет. В жидкость помещен подкрашенный парафин. Жидкость подобрана таким образом, чтобы плотность твердого парафина при комнатной температуре слегка превышала плотность этой жидкости, а плотность нагретого и расплавленного парафина была чуть меньше плотности жидкости. При выключенной лампе весь парафин находится в твердом состоянии и лежит на дне сосуда.

Примерно за один час до начала демонстрации нужно включить прибор в сеть ~ 220 В. После включения лампы сосуд начинает подогреваться снизу, и в нем в течение некоторого времени температура нижних слоев жидкости превышает температуру верхних слоев. После того, как температура у дна сосуда достигает температуры плавления парафина, он начинает плавиться, вследствие чего его плотность уменьшается. Поверхность расплавленного парафина, ставшего легче расположенной выше него жидкости, становится неустойчивой, выпячивается, и от нее отрываются капли разных размеров, которые всплывают в верхнюю часть сосуда (см. рис. 3.17). Мелкие капли под действием сил поверхностного натяжения приобретают сферическую форму, а крупные во время всплытия колеблются и деформируются. Поскольку температура в верхней части сосуда ниже, чем в нижней части, нагреваемой лампой, то всплывшие парафиновые капли остывают и сжимаются, становятся плотнее жидкости и тонут. Этот процесс будет повторяться до тех пор, пока имеется достаточная теплоотдача от верхней части прибора. После выключения лампы циклическое движение капель парафина через некоторое время прекращается.

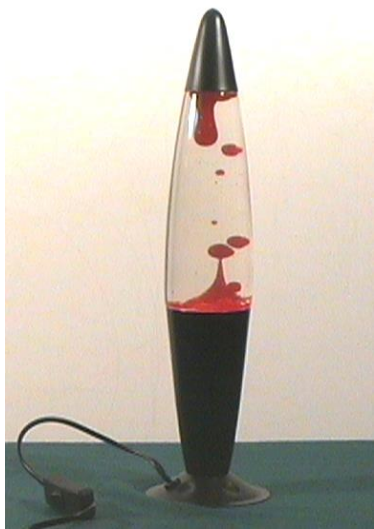


Рис. 3.17. Модифицированный опыт Дарлинга.

Если температура воздуха в помещении, где проводится демонстрация, слишком высока, то весь объем жидкости может быстро прогреться, и прибор начнет работать все хуже, а движение капель может вообще прекратиться. При слишком низкой температуре в помещении прибор может также не работать, если мощности лампы не будет хватать для разогрева парафина.

Таким образом, данное устройство демонстрирует принцип работы циклического теплового двигателя, который обязательно должен иметь «нагреватель» (дно сосуда, подогреваемое лампой), «холодильник» (верхняя часть сосуда, отбирающая теплоту у парафиновых капель и отдающая его в окружающую среду) и «рабочее тело» (парафин в жидкости). Оче-

видно, что данный тепловой двигатель совершает работу против сил тяжести (всплывающие капли теоретически могут поднимать небольшой груз). Наблюдение за работой этого устройства позволяет также пояснить, что для хорошей работы двигателя необходимо поддерживать по возможности более высокую разность температур между «нагревателем» и «холодильником». Прекращение циклического движения капель после выключения лампы показывает, что для работы любого реального двигателя необходим источник энергии, который поддерживает высокую температуру «нагревателя».

Данную демонстрацию, подобно предыдущей, можно использовать для показа автоколебаний при чтении раздела «Механика» курса общей физики.

3.7. Элементы синергетики.

3.7.1. Конвективные потоки в жидкости. Ячейки А. Бенара⁷.

Демонстрируются конвективные ячейки Бенара, которые образуются в плоском слое жидкости при наличии достаточной разности температур между его нижней и верхней поверхностями и также показывают возможность циклического преобразования теплоты в работу.

Явление конвекции играет важную роль в процессах теплообмена, однако визуальное наблюдение его в однородных прозрачных средах затруднено, поскольку температурные изменения показателя преломления невелики. Для наблюдения конвективных потоков удобно использовать взвеси мелких частиц в жидкостях, например, алюминиевой пудры в минеральном масле. При достаточной концентрации взвешенных частиц алюминия можно продемонстрировать явления, происходящие на поверхности жидкости, в отраженном свете – в проекции через эпидиаскоп или при помощи видеокамеры с проектором. Этот случай представляет большой интерес, поскольку в плоском горизонтальном слое жидкости при определенных условиях образуется упорядоченная структура конвективных потоков – ячейки Бенара. Эти ячейки являются типичным примером так называемых «диссипативных структур», которые возникают в открытых системах, далеких от равновесия, при закритических зна-

⁷ А. Бенар (1874 – 1939) – французский физик, в 1900 г. впервые продемонстрировал возникновение конвективных ячеек в тонком слое подогреваемой вязкой жидкости.

чениях внешних параметров и изучаются в рамках сравнительно недавно сформировавшегося научного направления – синергетики.

Опишем условия образования конвективных ячеек. Пусть слой жидкости заключен между двумя бесконечными горизонтальными плоскостями, нижняя из которых поддерживается при температуре T_1 , а верхняя – T_2 . Жидкость подогревается снизу, так что $T_1 > T_2$. При положительном коэффициенте объемного расширения α такое состояние жидкости будет неустойчивым, однако при небольших градиентах температуры вязкость препятствует конвективному движению, и перенос теплоты обеспечивается теплопроводностью. При достижении некоторой критической разности температур $\Delta T = T_1 - T_2$ в такой системе происходит скачкообразный «фазовый переход» в состояние с конвективными потоками, обладающее характерной упорядоченной структурой – чаще всего в виде шестигранных ячеек, в центре которых жидкость движется вверх, а по краям – вниз. Расчеты, находящиеся в хорошем согласии с экспериментальными данными, показывают, что переход происходит, когда число Рэлея (безразмерная разность температур)

$$R_\alpha = \frac{g\alpha\Delta T h^3}{\lambda\eta_k}$$

достигает критического значения $R_{\alpha(\text{крит})} \sim 1700$;

здесь g – ускорение свободного падения, h – толщина слоя жидкости, λ и η_k – коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости жидкости. При этом размер ячеек оказывается прямо пропорциональным толщине слоя жидкости.



Рис. 3.18. Демонстрация ячеек Бенара.

Прибор для демонстрации конвективных ячеек состоит из электроплитки и установленной на ней алюминиевой цилиндрической емкости (диаметр ~ 150 мм, высота ~ 40 мм) с достаточно толстым плоским дном (~ 5 мм). В емкость наливается слой масла толщиной около

5 мм с подмешанной в него алюминиевой пудрой. Удобно также использовать взвесь пудры в парафине, расплавляемую при каждом показе демонстрации и хранящуюся между опытами в емкости в твердом состоянии. Для устранения краевых эффектов жидкость отделена от стенок емкости цилиндрической вставкой из стекло-текстолита, плохо проводящего теплоту.

Прибор помещается на стол эпидиаскопа или под объектив видеокамеры, включается нагрев, и картина, наблюдаемая на поверхности жидкости в емкости, проецируется на экран. Демонстрируется возникновение ячеек при достижении критической разности температур (рис. 3.18). Слегка наклоняя емкость, можно продемонстрировать пропорциональность размеров ячеек толщине слоя жидкости. Если разрушить упорядоченную структуру перемешиванием взвеси, то можно убедиться в том, что она вскоре самопроизвольно восстанавливается, демонстрируя самоорганизацию.

3.7.2. Реакция Белоусова–Жаботинского⁸.

Демонстрируется пример автоколебательной химической реакции Белоусова–Жаботинского, которая представляет собой яркий пример самоорганизации, наблюдающейся в неравновесных термодинамических системах.

Для проведения реакции необходимо приготовить растворы следующих веществ (из расчета их конечных концентраций): малоновая кислота $C_3H_4O_4$ (0,2 моль/л), бромат натрия $NaBrO_3$ (0,3 м/л); серная кислота H_2SO_4 (0,3 моль/л); ферроин $(2^+)Fe(C_{12}H_8N_2)_3SO_4$ (0,005 моль/л). Около 5 мл раствора каждого из компонентов нужно налить в чашку Петри⁹ так, чтобы толщина слоя жидкости была ~0,5-1 мм. Поверхность чашки Петри нужно спроецировать на экран (например, при помощи видеокамеры и проектора). Через 3-8 минут после приготовления раствора (переходный период) можно будет наблюдать «химические автоколебания» и «химические волны» – цвет раствора будет периодически изменяться от лилово-красного к синему, и обратно. На поверхности чашки Петри начнут

⁸ Б. П. Белоусов (1893 – 1970) – советский военный химик, биофизик, в 1951 г. открыл первую автоколебательную химическую реакцию; А. М. Жаботинский (1938 – 2008) – советский, затем американский биофизик, в 1961 г. исследовал механизм реакции, открытой Б. П. Белоусовым.

⁹ Ю. Р. Петри (1852 – 1921) – немецкий микробиолог, изобрел в 1877 г. посуду для лабораторных исследований, позже названную его именем.

возникать и двигаться различные разноцветные фигуры – концентрические окружности, спирали, «вихри», распространяющиеся со скоростью около 1 мм/мин (рис. 3.19). Реакцию можно также показывать в химическом стакане (см. рис. 3.20)¹⁰.

Эффекты, наблюдаемые при протекании реакции Белоусова–Жаботинского, объясняются периодическими изменениями концентраций промежуточных продуктов химических реакций, которые происходят в растворе в процессе установления термодинамического равновесия.



Рис. 3.19. Реакция Белоусова–Жаботинского в чашке Петри.

В связи с тем, что постановка данной демонстрации требует применения сравнительно редких химических реактивов и довольно высокой квалификации демонстратора как лаборанта-химика, опыт рекомендуется показывать в видеозаписи.

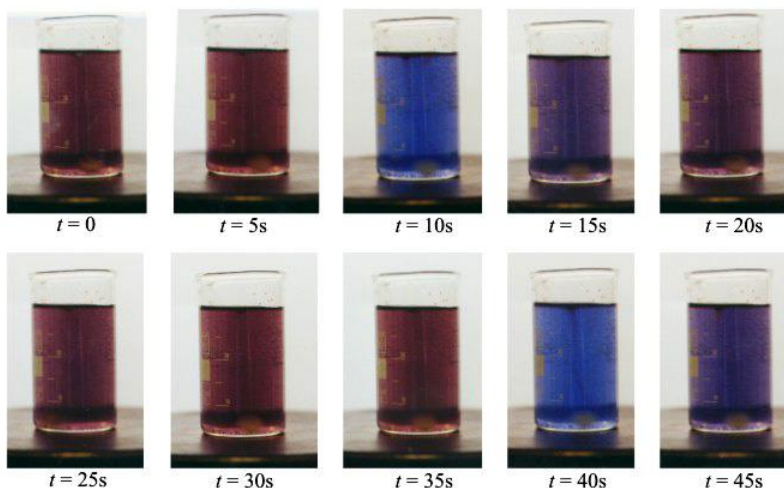


Рис. 3.20. Реакция Белоусова–Жаботинского в химическом стакане.

¹⁰ Фотографии взяты из Интернета.

Глава 4

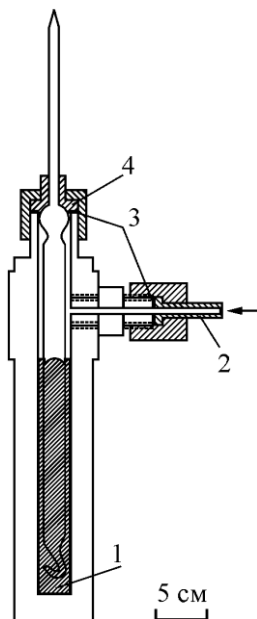
РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ЖИДКОСТИ

Лекционные эксперименты, иллюстрирующие свойства реальных газов и жидкостей, следует демонстрировать после рассмотрения свойств идеального газа в рамках статистического и термодинамического подходов и перехода к изучению свойств газов с межмолекулярными взаимодействиями [10, 11].

4.1. Сжижение углекислоты. Опыт Кальете¹.

Известно, что реальный газ, критическая температура которого выше комнатной, можно превратить в жидкость, сжимая его при постоянной температуре. Это демонстрируется на примере сжижения углекислоты в вертикальном стеклянном капилляре, в который снизу под давлением накачивается жидкая ртуть [4].

Основной частью демонстрационного прибора является закрытый сверху толстостенный стеклянный капилляр, который снизу переходит в более широкую открытую стеклянную ампулу (см. рис. 4.1). Верхняя часть капилляра заполнена углекислым газом. Нижняя часть стеклянной ампулы помещена в герметичный металлический стакан – давящую камеру. Эта камера и нижняя часть ампулы заполнены ртутью 1. Верхняя часть камеры заполнена машинным маслом и соединена через горизонтальный штуцер 2 с ручным гидравлическим масляным прессом. Давильная камера герметизирована при помощи кожаных уплотнительных прокладок 3 и латунной втулки 4 с менделеевской замазкой. Все уплотнения зажимаются накладными гайками. Давление масла можно контролировать по показаниям манометра. Выступающая из давящей камеры верхняя часть капилляра демонстрируется на



¹ Л.-П. Кальете (1832 – 1913) – французский физик, член Парижской академии наук.

экране с помощью проекционного фонаря и оборотной призмы с объективом либо при помощи видеокамеры и проектора. Верхняя часть капилляра помещается в прозрачный плоскопараллельный сосуд из оргстекла, в который перед показом демонстрации наливается холодная вода. Этот сосуд с водой выполняет сразу три функции – вода улучшает качество изображения на экране при демонстрации опыта в проекции (из-за близости показателей преломления воды и стекла); вода служит тепловым фильтром, не допуская нагрева углекислоты от проекционного фонаря; сосуд защищает капилляр от повреждений, а аудиторию – от осколков стекла и разлива ртути при возможном разрушении капилляра во время показа опыта.



Рис. 4.2. Опыт Кальете.

При медленном повышении давления до 65-70 атмосфер над ртутью в капилляре появляется слой жидкой углекислоты, который по мере сжатия при практически неизменном давлении занимает все большую часть объема капилляра с углекислотой (рис. 4.2). После того, как весь этот объем заполняется жидкостью, давление начинает быстро расти. Затем давление уменьшают, объем углекислоты увеличивается, она закипает и испаряется при практически постоянном давлении, а после полного испарения жидкости давление начинает падать. Таким образом, демонстрируется независимость давления насыщенного пара от его объема в двухфазной области на изотерме реального газа.

4.2. Сжижение метана в воздушном шарике.

Газ можно превратить в жидкость не только путем сжатия при температуре ниже критической, но и путем охлаждения при постоянном давлении. Это демонстрируется следующим образом.

Природный газ – метан, который кипит при нормальном давлении при температуре около $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, нужно накачать в воздушный шарик при помощи насоса. Горловину шарика завязать нитью длиной около 1,5 м, второй конец которой прикрепить к штативу либо к тяжелой гирьке, чтобы шарик парил в воздухе (метан почти вдвое легче воздуха), но не улетал к потолку аудитории. Затем

нужно взять шарик в руку и, держа его за завязанную горловину, начать аккуратно поливать из сосуда Дьюара² жидким азотом, имеющим температуру $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.3). При этом нужно стараться, чтобы азот попадал на большую часть поверхности шарика. Шарик довольно быстро сморщится, сильно уменьшившись в объеме, поскольку объем жидкого газа в сотни раз меньше, чем у газообразного, а внутри шарика образуется лужица из жидкого метана. Шарик со сжиженным метаном нужно продемонстрировать зрителям (например, при помощи видеокамеры и проектора), после чего положить на стол. Из-за теплообмена с окружающей средой жидкий метан будет кипеть внутри шарика и постепенно вновь превращаться в газ, а оболочка шарика будет с хрустом расправляться. Вскоре лужица жидкого метана исчезнет, шарик окончательно расправится, увеличится в объеме и в конце опять взлетит вверх.

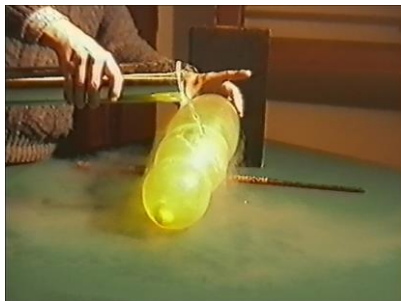


Рис. 4.3.
Сжижение метана
в воздушном шарике.

Для показа демонстрации лучше использовать шарики из прозрачных материалов (бесцветные или бледно-желтые). Можно также использовать подходящие бытовые пластиковые пакеты (например, прозрачные мешки для мусора). Вместо метана для наполнения шарика можно использовать газ из бытовых газовых баллонов (пропан-бутан) или углекислоту. В этом случае шарик не будет взлетать, поскольку эти газы тяжелее воздуха, но они имеют температуры кипения существенно более высокие, чем метан, и будут легче сжижаться.

4.3. Нагревание реального газа при постоянном объеме (взрыв бутылки с жидким азотом).

Во время демонстрации показывается разрывание пластиковой бутылки под действием давления находящегося в ней жидкого азота, который нагревается от атмосферного воздуха и испаряется.

² Д. Дьюар (1842 – 1923) – шотландский физик и химик, член Лондонского королевского общества.

Для показа демонстрации нужно аккуратно налить жидкий азот из сосуда Дьюара в стандартную пластиковую бутылку (из-под газированных напитков) емкостью 0,5 или 1 л так, чтобы уровень азота в ней составлял ~ 3 -5 см. Осторожно наклоняя бутылку, охладить жидким азотом ее стенки вдоль всей их высоты (если при этом азот полностью испарится, то нужно долить его в бутылку до нужного уровня). Затем плотно завинтить крышку, чтобы бутылка оказалась герметично закрытой, и положить ее на бок на горизонтальную поверхность на расстоянии не менее 5-7 м от зрителей (рис. 4.4). При этом горлышко бутылки должно быть ориентировано в направлении от аудитории. Далее нужно убрать со стола сосуд Дьюара с остатками жидкого азота и отойти от бутылки на безопасное расстояние.



Рис. 4.4. Взрыв бутылки с жидким азотом.

Жидкий азот будет постепенно нагреваться от стола и от окружающего бутылку атмосферного воздуха и испаряться. Если бы жидкий азот испарялся при постоянном давлении, не имея ограничения в виде стенок бутылки, то его объем при переходе из жидкого состояния в газообразное увеличился бы примерно в 700 раз. Но, так как испарение происходит при фиксированном объеме, то давление

внутри бутылки сильно повышается. Через некоторое время, когда напряжения, создаваемые силой давления, превысят предел прочности бутылки, она разорвется и разлетится на небольшие осколки. Поскольку стандартные пластиковые бутылки могут выдерживать достаточно большое давление (до 10 атмосфер и более), то при разрыве образуется ударная волна, которую ухо воспринимает как звук от довольно сильного взрыва.

Данная демонстрация требует особой осторожности при показе. Перед ее проведением необходимо поставить несколько пробных экспериментов, в ходе которых нужно подобрать для бутылки в аудитории такое место, от которого осколки пластика гарантированно не могут долететь до зрителей. Главную опасность при разрыве бутылки представляет ее горлышко с пробкой, которое почти всегда остается целым и, имея значительную массу и боль-

шую скорость, может поранить зрителей или демонстратора. Именно поэтому бутылку при показе данной демонстрации следует класть так, чтобы ее горлышко было направлено от зрителей. Перед показом данной демонстрации также рекомендуется убрать с аудиторного стола все приборы и предметы, которые могут быть повреждены осколками бутылки. Разрывание бутылки сопровождается очень громким хлопком, от которого у близко сидящих зрителей, как правило, закладывает уши. Перед показом демонстрации рекомендуется заранее предупредить об этом зрителей и дать возможность всем желающим пересесть на дальние ряды аудитории. По этой же причине рекомендуется показывать данную демонстрацию в конце лекции.

При показе демонстрации можно класть закупоренную бутылку с жидким азотом за установленную на столе аудитории достаточно прочную пластиковую загородку с открытым верхом и высотой стенок не менее 0,5 м. В этом случае образовавшиеся при разрывании бутылки осколки и ударная волна уйдут вверх и гарантированно не повредят зрителям. Проще всего изготовить такую загородку, склеив друг с другом широким скотчем три или четыре пластины из оргстекла толщиной ~3-5 мм так, чтобы они образовали ящик без дна и без крышки (полосы скотча должны проходить вдоль ребер этого ящика). Перед использованием этого ящика на лекции его обязательно нужно испытать, чтобы убедиться в его прочности. В крайнем случае, данную демонстрацию можно показывать, положив бутылку с жидким азотом на пол за какой-нибудь массивный достаточно высокий предмет (например, за аудиторный стол) так, чтобы этот предмет загораживал бутылку от зрителей. При этом, однако, пострадает качество демонстрации, так как зрители только смогут услышать сопровождающий разрывание бутылки хлопок.

Особую зрелищность данная демонстрация приобретает, если закрытую бутылку с жидким азотом положить на стол, накрыв сверху перевернутым десятилитровым жестяным ведром. После взрыва бутылки ведро взлетит вверх, как ракета, на высоту нескольких метров.

Демонстрация может не получаться в случае, если бутылка негерметично закрыта или если в нее налито слишком мало жидкого азота. С другой стороны, если в бутылку налито слишком много азота, то он будет нагреваться и испаряться очень медленно, вследствие чего разрыва бутылки придется ждать очень долго. Поэтому при

проведении перед показом демонстрации пробных экспериментов нужно заметить уровень жидкого азота в бутылке, при котором разрывание происходит через 4-6 мин после ее закупоривания.

4.4. Критическое состояние эфира.

Демонстрируется переход жидкости и пара в критическое состояние в результате нагревания вещества при постоянном объеме. Для показа опыта используется воздушная баня, в которой подогреваются три ампулы с эфиром (критическое давление около 36 атмосфер). Объем эфира в первой ампуле больше критического, во второй – равен критическому, а в третьей – меньше его.

Воздушная баня представляет собой металлический ящик с крышкой, в которой проделаны отверстия для вентиляции (они могут закрываться специальной заслонкой). В передней и задней стенках ящика сделаны два окошка из толстого стекла, предназначенные для пропускания света от проекционного фонаря (демонстрация показывается в проекции на экран). Ампулы с эфиром подвешиваются внутри ящика напротив окошек. Воздух в ящике прогревается при помощи двух электронагревателей, спирали которых размещены вдоль боковых стенок ящика (ни в коем случае не снизу под ампулами). В нижней части ящика находится электрический вентилятор, который создает циркуляцию воздуха внутри ящика, что обеспечивает равномерное прогревание его содержимого. Одинаковость температуры во всем объеме ящика необходима, поскольку при нарушении этого условия наблюдаемое явление сильно искажается.



Рис. 4.5. Демонстрация критического состояния эфира.

При показе демонстрации нужно получить на экране проекцию ампул, закрыть вентиляционные отверстия в воздушной бане, после чего включить нагреватель и вентилятор. По мере нагревания и кипения эфира в первой ампуле мениск на границе жидкости и пара поднимается вверх вследствие преобладания теплового расширения жидкости, и мениск исчезает вблизи верхней части ампулы. Во второй ампуле мениск в течение всего нагревания остается на месте. В третьей ампуле мениск опускается до дна, то есть весь эфир испаряется (рис. 4.5.). При

достижении критической температуры эфира (около $+194\text{ }^{\circ}\text{C}$) мениск в средней ампуле исчезает, что говорит о достижении критического состояния, в котором плотности жидкости и насыщенного пара одинаковы. После наблюдения критического состояния необходимо выключить нагрев и открыть вентиляционные отверстия в воздушной бане, не выключая при этом вентилятор. Ампулы охлаждаются, и в их объеме образуются вначале капли тумана, сильно рассеивающие свет, а затем они оседают на дно, и вновь образуется мениск, разделяющий две фазы – жидкую и газообразную.

4.5. Эффект Джоуля³–Томсона.

4.5.1. Дифференциальный эффект Джоуля–Томсона.

Демонстрируется дифференциальный эффект Джоуля–Томсона для воздуха, заключающийся в изменении его температуры при адиабатическом проталкивании (дросселировании) через пористую перегородку, на которой падает давление.

Демонстрационный прибор представляет собой закрепленный на подставке цилиндр с внутренним диаметром около 7 см, заканчивающийся штуцером для соединения с форвакуумным насосом (рис. 4.6). Внутри цилиндра заложен слой ваты толщиной $\sim 2\text{ см}$ (плотность слоя ваты определяется производительностью насоса). Для регистрации изменения температуры воздуха используется термopара, один спай которой помещен по одну сторону слоя ваты, а второй спай – по другую сторону. Термopара подключается к демонстрационному зеркальному гальванометру.



Рис. 4.6. Прибор для демонстрации эффекта Джоуля–Томсона.

Воздух комнатной температуры откачивается через слой ваты форвакуумным насосом. По направлению отклонения вдоль шкалы луча лазера, отражающегося от зеркала гальванометра, можно су-

³ Дж. П. Джоуль (1818 – 1889) – английский физик, член Лондонского королевского общества. Совместно с У. Томсоном (1824 – 1907) в 1852 – 1862 гг. обнаружил и исследовал эффект понижения температуры газа при дросселировании.

доть о знаке изменения температуры воздуха: в данном случае он отрицателен, то есть воздух в условиях опыта охлаждается. В этом можно убедиться, прикоснувшись после демонстрации опыта к наружному спая термопары пальцем – в результате нагревания наружного спая отклонение луча лазера вдоль шкалы увеличивается; это свидетельствует о том, что и при дросселировании температура наружного спая термопары была выше, чем внутреннего.

4.5.2. Интегральный эффект Джоуля–Томсона и ожижение азота.

В музее Кабинета физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова имеется установка, сконструированная и изготовленная в Физико-техническом институте низких температур АН УССР (г. Харьков) в шестидесятых годах XX века [4]. Она позволяет показать сильное охлаждение азота при интегральном эффекте Джоуля–Томсона, вызванном большим перепадом давления на дросселе газопровода; роль теплообменника в установках для получения низких температур; ожижение непосредственно в ходе лекции газа (азота) с температурой инверсии этого эффекта, превышающей комнатную. Далее приводится авторское описание⁴ работы прибора, который позволяет при наличии баллона со сжатым азотом объемом 80 л и начальным давлением 150 атм достигнуть начала ожижения газа в дьюаре через ~4 минуты и за 20 минут получить ~150 г жидкого азота:

«Принцип действия ожижителя основан на использовании эффекта Джоуля–Томсона. На фотографии (см. рис. 4.7) показан общий вид прибора. На фланце 1 смонтирован витой поперечноточный теплообменник с дроссельным игольчатым вентилем 2. Этот узел помещается в стеклянный дьюар 3 и уплотняется с ним по фланцу резинкой 4. Теплообменник состоит из 5 оребренных трубок, навитых спирально на сердечник и помещенных в кожух. Газ высокого давления от баллона поступает через вентиль 5 и штуцер 6 в теплообменник, проходит по трубкам и поступает к дроссельному вентилю 2, дросселируется в дьюар, а затем входит в обратную линию теплообменника – межтрубное пространство, после чего стравливается в атмосферу через отверстия во фланце. Давление в дьюаре меняется в зависимости от расхода газа и меряется манометром 7. Тем-

⁴ Б. Н. Есельсон и В. И. Зозуля, УФН **94**, 4 (1968).

пература среды в дьюаре контролируется термопарой медь – константан 8, э.д.с. которой измеряется милливольтметром 9.

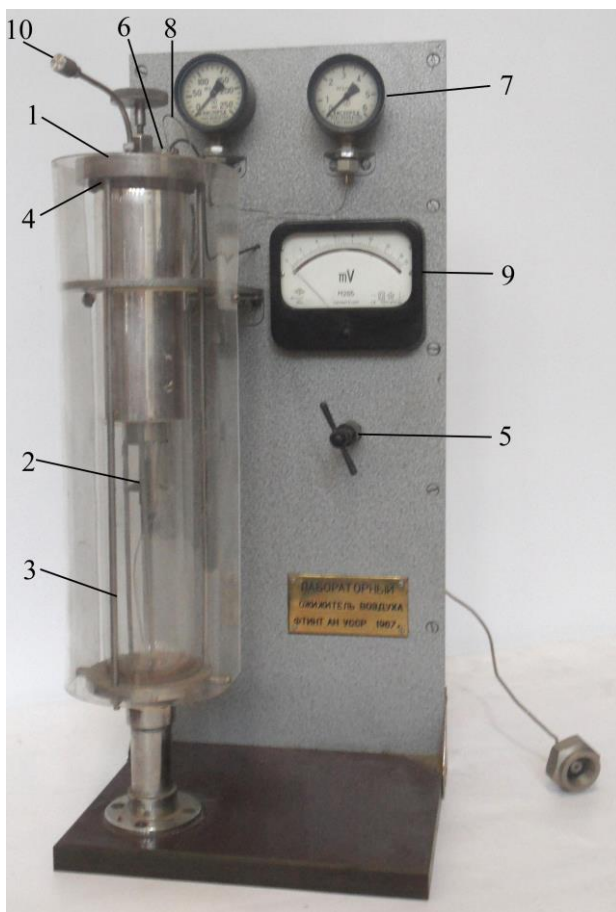


Рис. 4.7. Общий вид ожижителя.

Порядок запуска ожижителя. Подсоединить входной штуцер прибора к баллону с газом, при этом вентили 2 и 5 должны быть закрыты. Последовательно открывая вентили 5 и 2, продуть теплообменник со снятой заглушкой сифона 10. Закрыть дроссельный вентиль 2, навинтить заглушку 10. Медленно открывая дроссельный вентиль, установить расход газа, соответствующий давлению в дьюаре $1,5 \pm 2$ атм, и поддерживать его. В случае забивки дроссельного отверстия загрязнениями, содержащимися в газе,

проворачивать иглу вентиля в прямом и обратном направлениях. Температура ожигения воздуха (6,3 мВ по милливольтметру) достигается при давлении в дьюаре 1,5 атм через ~5 мин и при давлении 2,5 атм – через ~3 мин. Максимальное давление в дьюаре не должно превышать 3 атм!

Ожижаемые газы не должны содержать влаги, масла и углекислого газа. В противном случае теплообменник забьется и ожигения получить не удастся. Чистый воздух или азот можно получить от больших ожигителей азота или методом газификации жидких воздуха или азота. Сжиженную фракцию можно вытеснить из дьюара наружу через сифон поддавливанием изнутри дьюара, создаваемым небольшим расходом газа через дроссельный вентиль.

При демонстрации прибора в большой аудитории можно проецировать нижнюю часть прибора на экран с помощью объектива. В этом случае дьюар освещается ярким световым пучком, пропущенным предварительно через тепловой фильтр.»

4.6. Несжимаемость жидкости.

Описанные ниже эксперименты, демонстрирующие малую сжимаемость жидкостей, могут также применяться при чтении раздела «Механика» курса общей физики (см. книгу «Механика. Лекционный эксперимент» [17], демонстрации **8.4.1 – 8.4.3**).

4.6.1. Простреливание сосуда с водой.

Для демонстрации практической несжимаемости жидкостей используется пневматическая винтовка, стреляющая свинцовыми пулями калибра 4,5 мм и массой около 0,5 г. В качестве пулеулавливателя применяется картонная коробка, заполненная пластиковыми бутылками, между которыми проложены листы мягкого картона. Стрельба ведется по одноразовым стаканчикам, сделанным из тонкой белой пластмассы (рис. 4.8).

Два пластмассовых стакана, заполненных водой наполовину, ставят на подставку и простреливают их с расстояния 2-3 м пулями из пневматической винтовки. Вначале стреляют по одному из стаканов выше уровня воды: при этом в нем появляются две дырки (входное и выходное отверстия), но сам он не разрушается. После выстрела по другому стакану ниже уровня воды он лопается по всей высоте и может даже вовсе развалиться на две части.

Это происходит потому, что при попадании в стакан пули вода в нем не успевает подняться и сжимается на величину объема пули. Поскольку жидкость сжимается очень плохо (в частности, для воды изотермический модуль всестороннего сжатия составляет

$$K = -V \frac{\Delta p}{\Delta V} \sim 10^9 \text{ Па}), \text{ это}$$

приводит к резкому возрастанию давления на стенки стакана и его разрыву. При этом в месте попадания пули на стенке стакана остается отпечаток свинца, как при ударе пули о твердую преграду.

Винтовка имеет тугую пружину, поэтому при зарядании ее нужно «переламывать», упираясь прикладом о стол, одной рукой держась за ствол, а другой – за казенную часть около начала ствола. При показе демонстрации надо соблюдать особую осторожность. Винтовку и пули желательно вносить в аудиторию непосредственно перед показом демонстрации. Стрелять следует в сторону стены аудитории, противоположной зрителям, либо под углом к аудитории так, чтобы пули летели от зрителей. Перед стрельбой нужно убедиться, что на линии огня нет людей. Запрещается направлять ствол винтовки (даже незаряженной) в сторону студентов. Ни в коем случае нельзя стрелять вхолостую – это приводит к порче винтовки. Необходимо также следить, чтобы на металлические части винтовки не попадала влага.



Рис. 4.8.

Простреливание сосуда с водой.

4.6.2. Искра в жидкости.

Малую величину сжимаемости жидкости, т.е. ее практически несжимаемость, можно продемонстрировать при помощи следующего опыта.

Конденсатор большой емкости (около 100 мкФ) заряжается от высоковольтного источника питания до напряжения в 2-3 кВ и подключается к двум близко расположенным электродам, между которыми проскакивает искра и выделяется запасенная в конденсаторе энергия. Электроды опущены в стеклянный стакан

(рис. 4.9). Если стакан пуст, то при разряде с ним ничего не происходит, а если заполнить его водой, то возникающая после проскакивания искры ударная волна разрушает стакан. Опыт проводится также с алюминиевым цилиндром (корпусом от электролитического конденсатора), заполненным водой. После разряда он раздувается и лопаются. Эксперимент демонстрирует также принципы электроэрозионной обработки материалов, штамповки деталей при помощи ударных волн в жидкости и работы струйных принтеров, где капли чернил выбрасываются из сопла при проскакивании микроскопических искр внутри чернил.

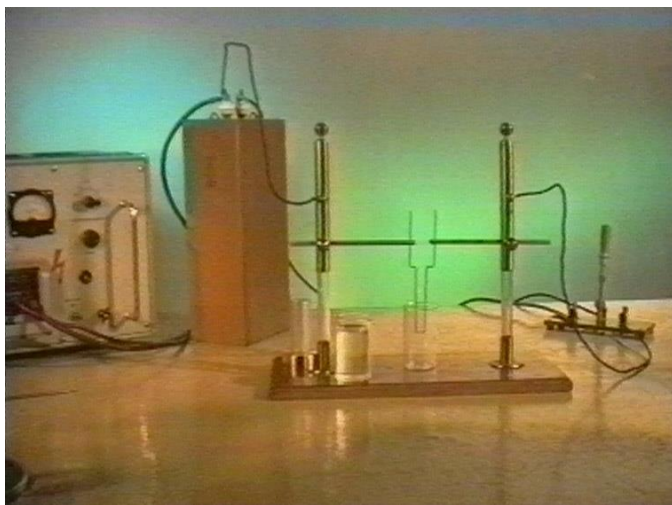


Рис. 4.9. Искра в жидкости – общий вид установки.

4.6.3. Пьезометр Вайнгольда⁵.

Пьезометр Вайнгольда служит для демонстрации сжимаемости жидкостей (идея опыта была предложена в свое время Эрстедом⁶) и устроен следующим образом (рис. 4.10). В замкнутый прочный цилиндр с прозрачными стеклянными стенками можно накачивать насосом воздух, создавая давление в 2-3 атмосферы. Внутри цилиндра закреплены два вертикально расположенных

⁵ А. Ф. Вайнгольд (1841 – 1917) – немецкий физико-химик, работал в гг. Лейпциг и Хемниц.

⁶ Г. Х. Эрстед (1777 – 1851) – датский физик, член Лондонского Королевского общества и Парижской Академии.

стеклянных капилляра длиной около 100 мм и диаметром около 1 мм: один запаян сверху и заполнен воздухом, а к другому сверху припаяна стеклянная сфера объемом около 100 см^3 , заполненная исследуемой жидкостью, в данном случае – дистиллированной водой. Нижние концы обоих капилляров погружены в чашку со ртутью, которая заполняет и часть объема второго капилляра. Первый капилляр служит для измерения давления воздуха в цилиндре: при повышении давления до двух атмосфер воздух в этом капилляре сжимается вдвое, и ртуть поднимается на половину его высоты. При этом уровень ртути во втором капилляре поднимается всего на 5 мм, так что сжимаемость воды, то есть относительное уменьшение ее объема при увеличении давления на одну атмосферу, очень мала и составляет примерно $1/20000$.



Рис. 4.10. Пьезометр Вайнгольда.

Дистиллированная вода, используемая в опыте, должна быть тщательно обезгажена путем длительного кипячения. Пьезометр весьма чувствителен к нагреванию, поэтому при проецировании на экран между прибором и фонарем надо устанавливать тепловой фильтр, например, кювету с водой.

Глава 5

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

После изучения свойств реальных газов и показа опытов по этой тематике можно переходить к рассмотрению фазовых превращений и демонстрации имеющихся лекционных экспериментов, иллюстрирующих процессы, происходящие при фазовых переходах первого рода, связанных с изменением агрегатного состояния вещества или его кристаллической структуры [10 – 12].

5.1. Испарение, кипение, конденсация.

5.1.1. Теплота испарения.

Демонстрируется наличие теплоты испарения у легкокипящей жидкости – серного эфира. Для этого используется модель газового термометра (см. демонстрацию **1.6.1**), состоящая из двух одинаковых стеклянных колб с воздухом, соединенных друг с другом через U-образный манометр (рис. 5.1). Горловины колб снабжены кранами, служащими для уравнивания давлений между внутренностью колб и атмосферой. В манометр заливается подкрашенная жидкость, и ее одинаковые начальные уровни в обоих коленах отмечаются метками в виде резиновых колечек, надетых на эти колена манометра.



Рис. 5.1. Демонстрация теплоты испарения эфира.

Для того чтобы перевести вещество из жидкого состояния в газообразное, необходимо оторвать его молекулы от жидкости и удалить их друг от друга, то есть сообщить им некоторую дополнительную энергию. На эти цели нужно затратить определенное количество теплоты, которое называется теплотой испарения (парообразования). Эта теплота зависит как от свойств

жидкости, так и от внешних условий (температуры и давления), и отнимается от самой испаряющейся жидкости, которая охлаждается и отнимает теплоту от окружающей среды. Для того чтобы продемонстрировать данное явление, нужно уравнивать давление в обоих коленах манометра с атмосферным, закрыть краны на гор-

ловинах колб, положить на одну из колб газового термометра кусок материи и полить его эфиром. После этого давление воздуха в этой колбе уменьшается (столб жидкости в соединенном с колбой колене манометра ползет вверх), что говорит об уменьшении ее температуры.

Наличие теплоты испарения можно легко почувствовать по охлаждению руки, если капнуть на нее эфир или другую легкокипящую жидкость. Этот эффект используется в медицине для «заморозки» травмированных конечностей.

5.1.2. Кипение воды под колоколом насоса.

Температура кипения жидкости зависит от внешнего давления. Вода при нормальном атмосферном давлении кипит при температуре $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при его понижении может кипеть и при комнатной температуре. Это демонстрируется следующим образом.

На вакуумную тарелку ставят стакан с водой, в которую погружен термометр, показывающий, что вода имеет комнатную температуру (около $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Тарелку накрывают колоколом и начинают откачивать из-под него воздух при помощи форвакуумного насоса. Через некоторое время после начала откачки давление под колоколом снижается до давления насыщенных паров воды при комнатной температуре (около 20 мм рт. ст.), и вода закипает: вначале в стакане появляются мелкие пузырьки, а затем начинается бурное кипение по всему объему жидкости. Температура воды при этом вначале практически не изменяется, но затем начинает медленно уменьшаться, поскольку от воды отбирается теплота испарения. Изображение кипящей воды и показания термометра рекомендуется проецировать на большой экран при помощи видеокамеры и проектора (см. рис. 5.2).

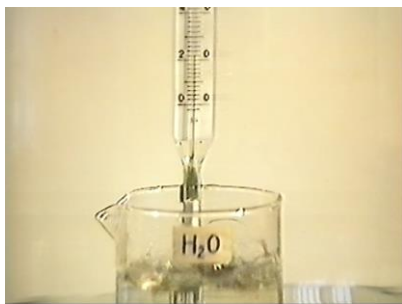


Рис. 5.2. Кипение воды под колоколом насоса.

После окончания демонстрации нужно перекрыть кран вакуумной тарелки (кипение воды при этом прекратится), выключить насос, отсоединить вакуумный шланг от крана тарелки и, слегка приоткрыв указанный кран, напустить под колокол воздух. Затем

нужно снять колокол с тарелки, вынуть из стакана термометр и передать стакан сидящим на первых рядах зрителям для того, чтобы они на ощупь убедились, что только что кипевшая вода имеет температуру, близкую к комнатной.

5.1.3. Кипение при охлаждении.

Понижение температуры кипения жидкости при уменьшении внешнего давления можно продемонстрировать при помощи следующего опыта.

В сферическую колбу среднего размера нужно налить холодную воду так, чтобы колба оказалась заполненной примерно наполовину. Затем нужно закрепить колбу за горлышко в зажиме-«лапке» в вертикальном положении (дном вниз), зажечь газовую горелку и отрегулировать положение колбы таким образом, чтобы ее нижняя часть находилась в верхней трети пламени. После закипания воды необходимо немного убавить пламя и выждать 3-5 минут, чтобы водяной пар вытеснил из колбы большую часть находящегося в ней воздуха. Затем, надев на руку плотную рукавицу, погасить горелку, взяться рукой в рукавице за горлышко колбы, осторожно вынуть колбу из зажима-«лапки» и сразу же плотно заткнуть колбу резиновой пробкой, с усилием «вворачивая» ее в горлышко. Перевернув колбу вверх дном, поместить ее на специальную кольцевую подставку с резиновыми амортизаторами так, чтобы широкая часть колбы лежала на подставке, а горлышко висело над поддоном (см. рис. 5.3). После этого нужно начать поливать дно колбы холодной водой так, чтобы вода стекала по всей колбе, охлаждая ее. При этом вода в колбе сразу закипает, что видно по выделению из нее больших пузырей. Кипение останавливается, если прекратить по-



Рис. 5.3. Кипение воды при охлаждении.

ливать колбу, и начинается снова, если возобновить полив. В связи с этим у зрителей создается впечатление, что жидкость кипит при охлаждении, откуда и происходит название опыта. В завершение демонстрации нужно снять колбу с кольцевой подставки, перевернуть ее горлышком вверх и, удерживая колбу рукой в перчатке, вынуть из гор-

лышка пробку. В момент вынимания пробки будет слышен громкий хлопок, который свидетельствует о том, что давление в колбе было пониженным по сравнению с атмосферным давлением.

Опыт объясняется тем, что после затыкания колбы пробкой в ней над поверхностью жидкости остается нагретая паровоздушная смесь. При поливании дна колбы холодной водой стенки колбы охлаждаются, на них конденсируются пары воды, давление над поверхностью жидкости уменьшается, и температура кипения воды, которая зависит от внешнего давления на жидкость, понижается. Благодаря достаточно большой теплоемкости вода при этом почти не остывает, и ее температура остается лишь немного ниже 100 °С. Поэтому возникшее уменьшение давления в колбе оказывается достаточным для того, чтобы вода вновь начала кипеть при пониженной температуре.

Для показа демонстрации можно использовать только сферическую колбу с круглым дном, так как плоскодонная может быть раздавлена атмосферным давлением. При переворачивании колбы нужно следить за тем, чтобы не ошпариться кипятком, который может начать вытекать из-под недостаточно плотно вставленной пробки.

5.1.4. Пленочное и пузырьковое кипение жидкого азота.

Демонстрируется пленочное и пузырьковое кипение жидкого азота при его контакте с различными телами.

Характер кипения жидкости при ее соприкосновении с каким-либо нагретым (относительно жидкости) предметом зависит от величины разности температур жидкости и этого предмета. Жидкий азот при атмосферном давлении имеет температуру около –196 °С. При соприкосновении с телами, находящимися при значительно более высокой комнатной температуре, жидкий азот быстро испаряется и образует тонкую газовую прослойку с низкой теплопроводностью. Такой тип кипения называется пленочным. При пленочном кипении непосредственный контакт между поверхностью предмета и жидкостью отсутствует. Температура предмета, контактирующего с кипящей жидкостью, понижается незначительно, а теплота от предмета к жидкости передается очень медленно. С течением времени контактирующий с кипящей жидкостью нагретый предмет постепенно охлаждается, газовая пленка между ним и жидкостью уже не может образовываться, и кипение из пленочного превращается в пузырьковое. При пузырьковом кипении

жидкость непосредственно контактирует с поверхностью нагретого предмета, и на всей этой поверхности происходит образование пузырьков газа, вследствие чего теплоотдача увеличивается, и предмет охлаждается заметно быстрее.

В начале демонстрации нужно налить жидкий азот в прозрачный сосуд Дьюара с широким горлышком. Вначале, пока стенки сосуда не остыли, они отделяются от жидкости пленкой испаряющегося азота, и теплообмен идет медленно. Затем, при уменьшении разности температур, жидкость «прилипает» к стенкам, смачивает их, и начинается пузырьковое кипение, при котором теплообмен ускоряется.



Рис. 5.4. Пленочное и пузырьковое кипение жидкого азота при погружении в него металлической линейки.

Эту же демонстрацию нужно повторить, погрузив в жидкий азот конец металлической линейки (рис. 5.4) – в этом случае переход от пленочного кипения к пузырьковому замечен особенно хорошо. Быстрее всего охлаждается концевая часть линейки, которая глубже всего погружена в азот, вследствие чего на ней вскоре начинается пузырьковое кипение, сопровождающееся выделением мелких пузырьков газа. Лежащие вы-

ше части линейки в это время все еще достаточно сильно нагреты, и кипение вблизи них носит пленочный характер. С течением времени линейка охлаждается, и граница пузырькового кипения постепенно смещается по ней вверх, к поверхности налитого в сосуд Дьюара жидкого азота, что непосредственно наблюдается во время демонстрации.

Далее нужно вынуть линейку из сосуда Дьюара, налить из него небольшое количество жидкого азота на поверхность воды в чаше и наблюдать поведение образовавшихся азотных капель. Капли сначала будут плавать на воде, медленно охлаждая ее (стадия пленочного кипения), а затем, после начала пузырькового кипения, вода вблизи азотных капель замерзнет. Образовавшиеся при этом льдинки нужно достать из стакана пинцетом и продемонстрировать зрителям. Наконец, нужно взять сосуд Дьюара в руку и не-

большими порциями выливать из него жидкий азот на обращенную ладонью вниз наклоненную кисть другой руки. Жидкий азот при этом будет скатываться с кожи, не причиняя ей никакого вреда. После этого для большей эффектности демонстрации можно вызвать из аудитории кого-нибудь из зрителей и аккуратно полить жидкий азот на его руку. Следует отметить, что при показе этой демонстрации кисть руки нужно держать наклонно над столом или над полом, не сжимая пальцы, и следить, чтобы жидкий азот не попал на одежду или в обувь. Ни в коем случае нельзя наливать жидкий азот в горсть – в этом случае пленочное кипение азота достаточно быстро сменится пузырьковым, и руку можно сильно обморозить.

5.1.5. Кипение перегретой воды.

В отсутствие центров парообразования температура жидкости может подниматься значительно выше нормальной температуры кипения. Это демонстрируется на примере перегрева дистиллированной воды в чистой колбе, где отсутствуют центры парообразования, на которых образуются пузырьки при обычном кипении.

Для демонстрации используется плоскодонная стеклянная колба объемом ~1 л, не имеющая дефектов на внутренних стенках, которая подбирается следующим образом. Подходящую по размеру колбу нужно тщательно вымыть теплой водой, затем прополоскать серной кислотой и, наконец, несколько раз обмыть изнутри дистиллированной водой. После этого в колбу заливается дистиллированная вода, колба устанавливается на подставке-треноге и нагревается при помощи газовой горелки через рассекатель пламени. Через некоторое время вода в колбе закипает, причем пузырьки пара обычно идут цепочками из нескольких мест со дна или стенок колбы – в этих местах имеются прилипшие соринки или дефекты поверхности. После закипания воды нужно выждать 15-20 минут – за это время соринки, служащие центрами парообразования, могут самостоятельно оторваться от стекла и всплыть, после чего кипение прекратится, и вода перегреется. Если этого не произойдет, то соринки можно попытаться сбросить со стекла при помощи куска чисто вымытой медной проволоки, конец которой загнут в виде кольца. Если сделать это не удастся, то колба признается негодной для эксперимента, и испытание повторяется со следующей отмытой колбой. Для ускорения работы в очередную испытываемую

колбу можно заливать уже прокипяченную воду, добавляя в нее недостающее количество холодной дистиллированной воды. Опыт показывает, что из партии одинаковых колб для данного эксперимента подходит примерно каждая пятая.

При показе демонстрации нужно вымыть заранее подобранную колбу так, как описано выше, налить в нее дистиллированную воду до начала горлышка, поставить колбу на рассекатель пламени и начать нагревать ее. Вскоре вода закипит, а затем перейдет в перегретое состояние, в котором ее температура на несколько градусов превышает температуру кипения. О том, что вода перегрелась, свидетельствует характер ее кипения: типичное для обычного кипения образование пузырьков пара во всем объеме жидкости отсутствует, но раз в несколько минут неожиданно образуются два-три больших пузыря, которые с шумом выходят на поверхность и выплескивают из колбы немного воды, после чего вода снова успокаивается и не проявляет признаков кипения еще несколько минут. Глядя на колбу с перегретой водой «на просвет», можно видеть сильные конвективные потоки, поднимающиеся от ее дна. Факт перегрева воды можно доказать, введя в колбу центры парообразования. Лучшее всего для этой цели подходит порошок мела: его легко получить, он безвреден, не реагирует с горячей водой, не царапает стенки колбы и, кроме того, мел имеет множество пор, заполненных воздухом, пузырьки которого представляют собой готовые «зародыши» для парообразования.



Рис. 5.5.
Кипение перегретой воды.

После того, как вода перегрется, нужно подойти к колбе на расстояние вытянутой руки, высыпать в колбу толченый мел и быстро отойти от нее. При попадании в воду мела она из-за наличия большого числа центров парообразования начинает бурно кипеть, и из горлышка колбы бьет фонтан горячих брызг и пара высотой 3-4 м (см. рис. 5.5). Температура

при этом быстро понижается до 100°C , поскольку от воды отнимается теплота испарения, и вскоре начинается процесс спокойного кипения. После того, как бурное кипение прекратится, нуж-

но обратить внимание зрителей на то, что вода продолжает кипеть обычным образом.

Если демонстрацию предполагается показывать не сразу после подготовки, а через некоторое время, то нужно, добившись перегрева воды, выключить горелку, свернуть из листа чистой бумаги конус и надеть его на горлышко колбы, чтобы предохранить налитую в нее воду от попадания пыли. Подготовленную таким образом демонстрацию можно показать в течение суток.

Поскольку подбор подходящей для демонстрации колбы требует больших затрат времени, то с колбой, в которой опыт хорошо получается, нужно обращаться крайне осторожно. Сразу после показа демонстрации колбу нужно тщательно вымыть, снабдить биркой, накрыть бумажным конусом и поставить ее в шкаф. Нельзя использовать эту колбу для других экспериментов. Нельзя применять для демонстрации вместо толченого мела песок, так как он может поцарапать стенки колбы и испортить ее.

При подготовке и показе демонстрации нужно проявлять осторожность. Во время отмывания колбы нужно, во избежание химических ожогов, очень аккуратно обращаться с серной кислотой. Не следует касаться руками зажженной горелки, подставки-треноги и горячей колбы. После высыпания мела в колбу нужно достаточно быстро отходить от нее, чтобы не обжечься паром и брызгами горячей воды. Зрители во время демонстрации должны находиться на расстоянии не менее трех метров от колбы. На столе, где проводится эксперимент, не должны лежать боящиеся влаги предметы.

5.1.6. Образование тумана при адиабатическом расширении воздуха.

Насыщенные пары воды при адиабатическом расширении воздуха становятся пересыщенными, и образуется туман, если в воздухе присутствуют центры конденсации. Это можно продемонстрировать следующим образом.

На вакуумную тарелку нужно поместить вату, обильно смоченную водой из стакана. Вата должна быть растянута по тарелке так, чтобы площадь ее поверхности была по возможности максимальной, но при этом вата не должна закрывать отверстие в дне тарелки, через которое производится откачка воздуха. Затем нужно накрыть тарелку колоколом и включить форвакуумный насос. После начала откачки воздух под колоколом адиабатически расширя-

ется, вследствие чего температура под колоколом понижается, и насыщенные водяные пары становятся пересыщенными. Однако, пока воздух под колоколом чистый и содержит мало центров конденсации, туман практически не образуется.



Рис. 5.6. Образование тумана при адиабатическом расширении

Через 1-2 минуты после начала откачки, убедившись, что заметного тумана не образовалось, нужно закрыть кран вакуумной тарелки и выключить насос. Затем отсоединить шланг насоса от крана тарелки, зажечь зажигалку, поднести пламя к крану и аккуратно приоткрыть его таким образом, чтобы язычок пламени начал «засасываться» в кран вместе с натекающим под колокол атмосферным воздухом. Содержа-

щиеся в пламени ионы будут нтекать под колокол и в дальнейшем станут играть роль центров конденсации. После того, как давление под колоколом сравняется с атмосферным, нужно вновь подсоединить к открытому крану шланг насоса и, включив его, возобновить откачку. После этого под колоколом насоса будет наблюдаться образование густого тумана (см. рис. 5.6), клубы которого будут постепенно высасываться форвакуумным насосом.

Для того чтобы процесс образования тумана был хорошо виден, стенки колокола должны быть чистыми. Для показа демонстрации предпочтительно применять зажигалку без металлических частей, которые за время, необходимое для напуска под колокол ионов, сильно разогреваются и могут обжечь пальцы. Вместо пламени зажигалки при показе демонстрации можно использовать пламя горящей спички или лучины.

5.2. Плавление и кристаллизация.

5.2.1. Ртутный молоток.

В этом опыте демонстрируется фазовый переход – затвердевание жидкой ртути при охлаждении ее ниже температуры плавления (-39°C). Ртуть наливается в деревянную форму, позволяющую получить отливку в виде молотка. Затем в жидкую ртуть погружается ручка (в ее нижнюю часть можно предварительно вбить не-

большой гвоздик для улучшения сцепления замерзшей ртути с ручкой), и форму поливают жидким азотом, имеющим температуру $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Через некоторое время, когда ртуть затвердеет, получившийся молоток с ручкой аккуратно извлекают из формы при помощи стамески (после того, как замерзшая ртуть начнет отделяться от дерева, рекомендуется еще немного по-

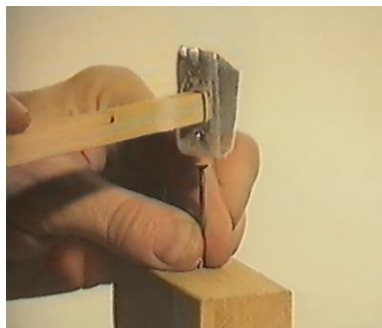


Рис. 5.7. Ртутный молоток.

лить ее жидким азотом). Этим ртутным молотком можно забить стальной гвоздь в кусок дерева (см. рис. 5.7). Поскольку ртуть, как и все чистые металлы, является довольно мягким веществом, при забивании гвоздя молоток деформируется, и от него могут отлетать небольшие кусочки. Затем демонстрируется обратный переход ртути в жидкое состояние – молоток плавится при погружении в сосуд с жидкой ртутью комнатной температуры.

Проведение опытов со ртутью на лекциях не разрешается по правилам техники безопасности, поэтому данная демонстрация может быть показана только в видеозаписи.

5.2.2. Замерзание кипящей воды.

Небольшое количество воды, кипящей при откачке под колоколом форвакуумного насоса, может замерзнуть из-за того, что от нее отбирается теплота испарения.

Для демонстрации этого явления нужно поставить на стол вакуумную тарелку с колоколом и при помощи вакуумного шланга подсоединить форвакуумный насос к открытому крану вакуумной тарелки. Поставить на тарелку чашку Петри (вместо нее можно использовать фарфоровую чашечку) и часовое стекло, перевернутое выпуклой стороной вниз. При этом нужно следить, чтобы чашка и стекло не стояли вблизи отверстий вакуумной тарелки, через которые осуществляется откачка. Затем нужно налить в часовое стекло холодную водопроводную воду и положить в нее несколько маленьких фарфоровых шариков, а в чашку Петри налить немного концентрированной серной кислоты. Накрывать вакуумную тарелку колоколом, включить форвакуумный насос и наблюдать за состоянием воды, налитой в часовое стекло (это удобно делать на экране при по-

мощи видеокамеры и проектора). Через одну-две минуты в воде появятся пузырьки – она закипит. Еще через несколько минут на поверхности воды начнет образовываться ледяная корка, под которой будет продолжаться кипение. Через некоторое время вся вода в часовом стекле замерзнет (см. рис. 5.8). Когда это произойдет, нужно перекрыть кран вакуумной тарелки, выключить насос и напустить

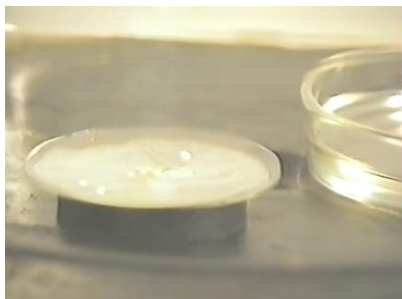


Рис. 5.8.

Замерзание кипящей воды.

под колокол воздух. Затем снять колокол, вынуть из часового стекла образовавшуюся в нем ледяную линзу и передать ее сидящим на первых рядах зрителям для того, чтобы они убедились в замерзании воды. После окончания демонстрации серную кислоту нужно слить из чашки Петри в специальный сосуд, а фарфоровые шарики собрать и сохранить

для повторного использования.

Наблюдаемое явление объясняется следующим образом. С уменьшением давления температура кипения воды понижается. Если при помощи откачки довести давление воздуха под колоколом до давления насыщенных паров воды при комнатной температуре (около 20 мм ртутного столба), то вода, налитая в часовое стекло, закипит, оставаясь холодной. При кипении вода отдает теплоту, необходимую для парообразования, вследствие чего ее температура постепенно понижается. Образующиеся при этом водяные пары в дополнение к откачке поглощаются концентрированной серной кислотой. Когда кипящая вода охлаждается до 0°C , она начинает замерзать. Лежащие в часовом стекле фарфоровые шарики играют роль центров парообразования при кипении и центров кристаллизации при замерзании воды. В течение некоторого времени в часовом стекле одновременно существуют две фазы воды – твердая (лед) и жидкая, причем жидкость продолжает кипеть. После начала процесса замерзания от кипящей воды при постоянной температуре замерзания отнимается теплота кристаллизации до тех пор, пока вся вода не замерзнет.

Для того чтобы процессы кипения и замерзания воды были хорошо видны, стенки колокола должны быть чистыми. Не следует применять для опыта дистиллированную воду, так как она практи-

чески лишена центров кристаллизации. Для демонстрации годится только концентрированная серная кислота. При работе с ней следует соблюдать осторожность, чтобы не получить химический ожог и не испортить вакуумную тарелку. В частности, при снятии колокола с тарелки ее нужно крепко удерживать рукой, чтобы налившаяся в чашечку кислота не расплескалась.

5.2.3. Кристаллизация переохлажденного гипосульфита.

5.2.3.1. Теплота кристаллизации.

В отсутствие центров кристаллизации расплав гипосульфита может быть переохлажден до температуры значительно меньшей, чем температура плавления, – вполне реально переохладить его до $\sim 20^\circ\text{C}$. Такое состояние жидкого гипосульфита является метастабильным, и поэтому после того, как в расплаве появляются центры кристаллизации, он сразу же начинает переходить в твердое состояние. При этом выделяется теплота кристаллизации, и температура гипосульфита повышается практически до нормальной температуры плавления. Это можно продемонстрировать при помощи следующего опыта.

Плоскодонная стеклянная коническая или круглая колба объемом $\sim 0,5$ литра примерно до половины заполняется кристаллическим гипосульфитом (химическая формула – $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; другие названия – натрий серноватистокислый пятиводный, кристаллогидрат натрия тиосульфат). В колбу помещается термометр, позволяющий измерять температуру не менее чем до $+50^\circ\text{C}$. Затем при помощи газовой горелки или электроплитки колба нагревается на водяной бане. После того, как находящийся в колбе гипосульфит полностью расплавится, нужно вынуть из водяной бани колбу и поставить ее на стол. Нужно по возможности не трогать колбу в процессе остывания, поскольку любая встряска может вызвать начало кристаллизации гипосульфита. Изображение верхней части колбы и погруженного в гипосульфит термометра надо получить на экране при помощи видеокамеры и проектора (см. рис. 5.9).



Рис. 5.9. Кристаллизация переохлажденного гипосульфита (первый вариант).

Дождавшись, пока колба остынет примерно до комнатной температуры, нужно бросить в нее два-три кристалла гипосульфита. Вокруг них начнется затвердевание переохлажденного расплава, при этом будет выделяться теплота кристаллизации. Будет видно, как вокруг термометра, погруженного в расплав, растут кристаллы гипосульфита. Через некоторое время температура поднимется до нормальной точки плавления ($+48\text{ }^{\circ}\text{C}$), и дальше в процессе кристаллизации она изменяться не будет.

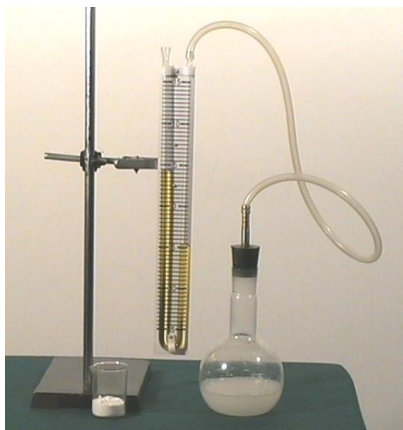


Рис. 5.10. Кристаллизация переохлажденного гипосульфита (второй вариант).

ления теплоты фазового перехода температура находящегося в колбе воздуха будет повышаться, а давление – увеличиваться, что и будет регистрироваться манометром (см. рис. 5.10).

Так как от момента начала нагревания колбы до перехода гипосульфита в переохлажденное состояние проходит около двух часов, то нагревание колбы нужно начинать заблаговременно, с таким расчетом, чтобы гипосульфит успел переохладиться к указанному лектором сроку. Для сокращения времени подготовки демонстрации можно охлаждать расплавленный гипосульфит в проточной холодной воде. Можно также получить переохлажденный гипосульфит заранее, перед началом лекции, и демонстрировать только процесс его кристаллизации, сопровождающийся разогревом (при этом колбу с заранее переохлажденным гипосульфитом нужно накрыть колпачком из чистой бумаги для предотвращения попадания в нее пыли).

Демонстрацию также можно показывать и в другом варианте. В горлышко колбы вставляют плотную резиновую пробку с пропущенной через нее металлической трубкой. После переохлаждения гипосульфита и его остывания до комнатной температуры в колбу нужно бросить через трубку несколько кристаллов гипосульфита и сразу после этого подсоединить к трубке шланг, идущий к U-образному манометру. Гипосульфит в колбе сразу же начнет кристаллизоваться, и из-за выде-

Колбу с гипосульфитом можно нагревать только на водяной бане. Категорически запрещается плавить гипосульфит непосредственно на открытом огне или доводить его до кипения – это приведет к его разложению и порче. Демонстрация может также не получаться из-за того, что гипосульфит от многочисленных нагреваний и охлаждений пришел в негодность – потерял кристаллизационную воду. В этом случае нужно наполнить колбу свежим гипосульфитом, который необходимо предварительно расплавить на водяной бане и тщательно профильтровать, пропустив через фильтровальную бумагу.

5.2.3.2. Рост кристаллов гипосульфита.

Красивый опыт, в котором производится наблюдение за ростом кристаллов гипосульфита, получается при использовании поляризованного света. Капли гипосульфита, расплавленного на водяной бане, зажимаются между двумя чистыми стеклянными пластинками так, чтобы немного жидкости выдавилось к краям пластинок, и переохлаждаются. После этого пластинки помещаются между поляризатором и анализатором, вся система подсвечивается снизу, и ее изображение проецируется на экран при помощи кодоскопа или видеокамеры и проектора. Если бросить в жидкий гипосульфит в месте его выступания наружу маленький кристаллик гипосульфита, то переохлажденное вещество между стеклами начнет кристаллизоваться (см. рис. 5.11). Процесс начнется с края капли (от брошенного кристалла), и будет постепенно распространяться на всю ее площадь. Растущие двулучепреломляющие кристаллы ориентированы между стеклами по-разному, и поэтому при наблюдении в поляризованном свете имеют яркую разноцветную окраску, которая зависит от взаимной ориентации анализатора и поляризатора и меняется при вращении анализатора.

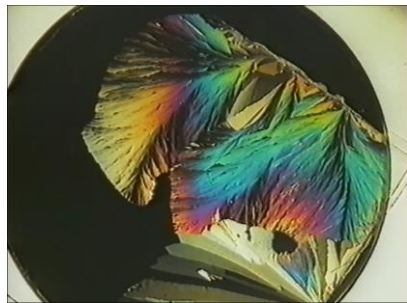


Рис. 5.11 .

Рост кристаллов гипосульфита.

При подготовке расплавленного гипосульфита для показа данного опыта следует выполнять рекомендации, приведенные в описании предыдущей демонстрации. Опыт может также демонстрироваться при изучении раздела «Оптика» курса общей физики.

5.3. Зависимость температуры плавления парафина от давления.

У парафина температура плавления увеличивается с ростом давления. Это можно продемонстрировать при помощи прибора, полностью аналогичного тому, который используется для показа опыта Кальете (см. демонстрацию 4.1). Отличие состоит в том, что верхняя часть стеклянного капилляра, помещенного в давящую камеру, заполнена не углекислотой, а парафином. Снаружи капилляр окружен водяной баней, содержащей нагревательный элемент и термометр. Выступающая из давящей камеры верхняя часть капилляра демонстрируется на экране с помощью проекционного фонаря и оборотной призмы с объективом либо при помощи видеокамеры и проектора. При комнатной температуре парафин находится в твердом состоянии, поэтому при наблюдении проекции на экране канал капилляра непрозрачен. Если включить нагреватель, то при нормальном атмосферном давлении парафин расплавится при температуре около $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, и канал капилляра станет прозрачным. Если теперь, сохраняя температуру водяной бани около $+56\text{ }^{\circ}\text{C}$ (это немного выше, чем точка плавления парафина при атмосферном давлении) начать повышать давление в капилляре, то при давлении $\sim 100\text{--}150\text{ атм.}$ парафин снова перейдет в твердое со-



Рис. 5.12. Демонстрация зависимости температуры плавления парафина от давления.

стояние, и канал капилляра опять станет непрозрачным (см. рис. 5.12). При сбросе давления до атмосферного канал капилляра вновь станет прозрачным – парафин расплавится. Опыт с подъемом и сбросом давления в капилляре нужно повторять несколько раз, при этом парафин переходит из жидкого состояния в твердое и обратно, хотя температура парафина при этом остается неизменной.

5.4. Сублимация и десублимация.

5.4.1. Испарение твердой углекислоты.

Процессы десублимации и сублимации, то есть перехода из газообразного состояния в твердое и обратно, минуя жидкую фазу, можно продемонстрировать на примере получения и возгонки твердой углекислоты.

Твердая углекислота получается при выпускании на воздух струи жидкой углекислоты из баллона, в котором она находится под давлением около 70 атмосфер. Для показа демонстрации нужно положить баллон с углекислотой на бок и слегка приподнять его донную часть так, чтобы вентиль оказался немного ниже дна баллона. На отверстие вентиля нужно



Рис. 5.13.

Сублимация твердой углекислоты.

надеть мешочек из плотной черной ткани и закрепить его завязками. При открывании крана жидкая углекислота начинает под напором выходить из баллона, тут же испаряется и при этом охлаждается. Затем ее пары адиабатически расширяются и охлаждаются еще сильнее, до очень низкой температуры. Так как давление в тройной точке для углекислоты (~ 5 атм) выше нормального атмосферного, то пары углекислоты переходят сразу в твердое состояние, минуя жидкое, то есть наблюдается десублимация. Получившаяся в мешочке твердая углекислота, похожая на снег, имеет температуру примерно -80°C . Ее нужно высыпать на стол (см. рис. 5.13). По мере нагревания она вновь испаряется, минуя жидкую фазу, то есть возгоняется (сублимирует). Видно, что на столе при этом не остается мокрых пятен, поэтому твердую углекислоту называют «сухим льдом».

Для показа демонстрации нужно использовать баллон, в котором находится довольно много жидкой углекислоты. Углекислый «снег» нельзя растирать пальцами, так как это может привести к сильному обморожению.

5.4.2. Возгонка нашатыря.

Сублимацию и десублимацию можно также продемонстрировать на примере возгонки нашатыря (хлористого аммония NH_4Cl). Для показа этой демонстрации нужно насыпать в длинную чистую сухую пробирку немного кристаллов нашатыря (слой порошка на дне пробирки не должен превышать 1 см) и закрепить ее на штативе при помощи зажима-«лапки» в наклонном положении под углом $\sim 30^\circ$ к горизонту. При этом «лапка» должна удерживать пробирку вблизи ее верхней открытой части. Затем нужно зажечь горелку, поставить ее под нижний конец пробирки и отрегулировать высоту пламени так, чтобы его верхняя треть нагревала засыпанный в пробирку нашатырь. При нагревании нашатырь испаряется, минуя жидкую фазу и разлагаясь при этом на NH_3 и HCl , которые, поднимаясь вверх и попадая в менее нагретую часть пробирки, соединяются вновь, образуя густой дым в виде белых хлопьев. Далее этот дым начинает оседать на среднюю и верхнюю часть пробирки, образуя мелкие белые кристаллы, то есть происходит обратный переход в твердое состояние из газообразного (см. рис. 5.14). Вскоре в пробирке можно наблюдать три области: нижнюю часть, в которой нагревается возгоняемый нашатырь; область, в которой на достаточно холодных стенках осели кристаллы; и, наконец, небольшую полосу чистого сильно нагретого стекла между возгоняемым нашатырем и осевшими кристаллами. В



Рис. 5.14.

Возгонка нашатыря.

последней области температура стенок пробирки превышает температуру начала возгонки, и поэтому в данной области нашатырь не осаждается – горячее стекло остается чистым. Демонстрацию можно показывать, проецируя пробирку с возгоняемым нашатырем на экран при помощи видеокамеры и проектора.

Для демонстрации нужно использовать сухую чистую пробирку из термостойкого стекла. Перед показом опыта нужно отрегулировать горелку так, чтобы ее пламя не давало копоти – в противном случае осевшая на пробирке сажа не позволит наблюдать демонстрируемое явление.

Глава 6

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Имеется большое количество классических демонстрационных экспериментов, иллюстрирующих физические явления, связанные с наличием и поведением границ раздела фаз [1, 3, 4]. Их следует демонстрировать в курсе молекулярной физики после рассмотрения фазовых переходов и свойств реальных газов [10 – 12].

6.1. Опыт Плато¹.

Если капля жидкости находится в условиях, когда на нее влияют только силы поверхностного натяжения, то площадь ее поверхности стремится к минимуму, и капля приобретает сферическую форму (рис. 6.1). Это демонстрируется в опыте Плато на примере каплей анилина, находящихся в прозрачном сосуде с раствором поваренной соли переменной концентрации.

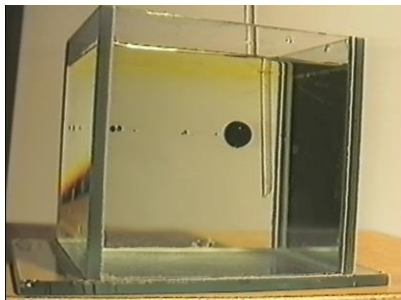


Рис. 6.1. Опыт Плато.

Чистый анилин не смешивается с водой и при комнатной температуре имеет плотность $\rho_a \approx 1,022 \text{ г/см}^3$, то есть он немного тяжелее воды ($\rho_v \approx 1 \text{ г/см}^3$) и значительно легче концентрированного соляного раствора ($\rho_c \approx 1,15 \text{ г/см}^3$). Если поместить анилин в сосуд с соляным раствором, плотность которого у поверхности меньше плотности анилина и плавно увеличивается с глубиной, то анилиновые капли будут тонуть в растворе до тех пор, пока не достигнут слоев раствора с плотностью, равной плотности анилина. При плавании в этих слоях действующая на каплю сила тяжести практически полностью компенсируется выталкивающей силой, то есть капля находится как бы «в невесомости». Поэтому форма капли определяется в основном действующими на нее силами поверхностного натяжения, которые стремятся уменьшить площадь поверхности капли и придают ей форму сферы. Небольшая несферичность наблюдаемых капель связана с тем, что достаточно труд-

¹ Ж. А. Ф. Плато (1801 – 1883) – бельгийский физик.

но получить соляной раствор нужной плотности с малым ее градиентом в вертикальном направлении.

Для показа опыта необходим отфильтрованный насыщенный раствор поваренной соли. При подготовке демонстрации нужно, используя зажим-«лапку», закрепить в штативе в вертикальном положении делительную воронку и подсоединить к ее выходу при помощи кусочка шланга длинную пипетку с узким концом. Закрывать кран делительной воронки и погрузить пипетку в плоскопараллельную кювету, до половины заполненную чистой водой, так, чтобы конец пипетки находился вблизи дна кюветы. Залить соляной раствор в делительную воронку, аккуратно приоткрыть кран и медленно напустить раствор в кювету так, чтобы он вытеснил воду в ее верхнюю половину, а граница раствора и чистой воды оказалась вблизи середины кюветы (температуры чистой воды и соляного раствора должны быть одинаковыми). После этого нужно закрыть кран делительной воронки, аккуратно вынуть пипетку из кюветы и при необходимости удалить из нее излишки воды или соляного раствора, используя для этого пипетку с надетой на нее спринцовкой. Затем следует выждать 2-3 часа, в течение которых граница соляного раствора и воды вследствие диффузии станет менее резкой, и в кювете образуется раствор соли, плотность которого плавно изменяется с высотой.

Далее нужно поместить в получившийся раствор капли анилина. Это можно сделать следующим образом. В шприц с толстой иглой нужно набрать анилин, опустить конец иглы в кювету с раствором примерно до половины ее глубины и медленно выдавливать анилин, который будет собираться в каплю вокруг конца иглы. При выдавливании капли нужно наблюдать, в какую сторону – вверх или вниз – она стремится, и в соответствии с этим приподнимать или опускать острие шприца. После того, как диаметр капли достигнет ~5 мм, нужно резко вынуть иглу из капли, дожидаясь, пока она успокоится, и удостовериться, что капля имеет почти сферическую форму. Если это так, то нужно вновь ввести иглу в каплю и увеличить ее диаметр до ~10 мм. Если же капля сильно сплюснута силой тяжести, то ее нужно аккуратно извлечь из раствора, засосав анилин обратно в шприц, и при помощи стеклянной палочки слегка перемешать раствор вблизи середины кюветы, уменьшив тем самым градиент плотности жидкости. После этого нужно вновь поместить в раствор анилиновую каплю и в случае, если она приобрела достаточно хорошую сферическую форму, довести ее диаметр

примерно до 10÷15 мм. Рядом с большой каплей нужно создать две или три более мелкие капли. Наблюдать капли удобнее всего на экране в проекции, полученной при помощи видеокамеры или проекционного фонаря.

При показе опыта нужно сначала при помощи иглы шприца или тонкой стеклянной палочки осторожно оттолкнуть плавающие капли от стенок стакана и обратить внимание зрителей на почти сферическую форму капель, а также на то, что при толкании капель стеклянной палочкой они начинают колебаться, но после успокоения колебаний форма капель восстанавливается. Затем нужно попытаться разбить большую анилиновую каплю на несколько более мелких, демонстрируя, что плавающий в соляном растворе анилин самостоятельно принимает форму сферы.

После окончания демонстрации необходимо собрать использованный анилин и слить его в специальную емкость. Не следует сливать использованный анилин обратно в бутылку с чистым анилином. Все емкости с анилином должны быть плотно закрыты, их нужно хранить в недоступном для посторонних месте. Всю посуду, применявшуюся для подготовки и показа опыта, после его окончания нужно вымыть и просушить.

Опыт особенно хорошо получается, если в качестве жидкостей разной плотности, близкой к плотности анилина, наливать в сосуд ненасыщенные соляные растворы разной крепости: 1,020 г/см³ (36 г соли на 1 литр воды) и 1,025 г/см³ (40 г соли на 1 литр воды).

6.2. Изменение поверхностного натяжения.

Небольшие добавки некоторых веществ (они называются поверхностно-активными) могут сильно изменять поверхностное натяжение жидкости и вызывать макроскопические движения. Это демонстрируется в следующих опытах.

6.2.1. Уменьшение поверхностного натяжения воды.

В данном опыте показывается влияние поверхностно-активных веществ на коэффициент поверхностного натяжения воды.

В чистую плоскодонную кювету нужно налить воду (лучше всего – только что взятую из водопровода). Затем на экране нужно получить изображение поверхности воды – это можно сделать при помощи видеокамеры и проектора либо с использованием фонаря для горизонтальной проекции (в последнем случае дно кюветы должно

быть прозрачным). На поверхность воды следует насыпать немного мелкого порошка – удобнее всего использовать толченый мел.

Поверхностное натяжение воды сильно уменьшается, в частности, под действием паров эфира. Для демонстрации этого факта нужно налить в пробирку из пузырька немного эфира, взболтать его в пробирке, потом вылить эфир обратно в пузырек, а пробирку заткнуть пальцем. В результате в пробирке останутся пары эфира, которые тяжелее воздуха. Если открыть пробирку и поднести ее отверстие к поверхности воды (вблизи центральной части кюветы), то пары эфира попадут на воду, уменьшив ее коэффициент поверхностного натяжения. В результате частицы порошка разбегутся к стенкам кюветы, образовав одно или несколько «окон». Это произойдет из-за того, что силы поверхностного натяжения, действующие на частицы порошка, будут больше там, где больше коэффициент поверхностного натяжения – то есть с тех сторон, где находится чистая вода. «Окна» будут довольно быстро затягиваться по мере испарения эфира.

При отсутствии эфира для показа демонстрации можно использовать мыльный раствор. Капля такого раствора помещается на конец стеклянной палочки или трубочки. Если прикоснуться этим концом к поверхности воды, посыпанной порошком, то поверхностное натяжение в месте касания сильно уменьшится, и порошок «разбежится» к краям кюветы.

6.2.2. Искусственная «амёба».

В опыте демонстрируется возникновение макроскопических движений вследствие локальных изменений поверхностного натяжения жидкости.



Рис. 6.2. Искусственная «амёба».

В чашку Петри нужно налить чистую воду и получить на экране изображение ее поверхности. Затем на поверхность воды нужно капнуть клей БФ-2 или БФ-6 таким образом, чтобы получилась вытянутая капля неправильной формы длиной 2-3 см (рис. 6.2). Клеи БФ содержат в своем составе спирт (его коэффициент поверхностного натяжения

при 20 °С равен ≈ 23 мН/м, то есть примерно в 3 раза меньше, чем у чистой воды). Спирт растворяется в воде, что приводит к изменению поверхностного натяжения вблизи капли. Так как растворение происходит неравномерно, то силы поверхностного натяжения, действующие на каплю с разных сторон, не уравниваются друг друга. Под действием этих нескомпенсированных сил капля расплзается, меняя свою форму, изгибается, а также совершает поступательное и вращательное движение, что напоминает поведение живого существа – амёбы (отсюда происходит название демонстрации). По мере растворения спирта коэффициент поверхностного натяжения жидкости по разные стороны от капли становится одинаковым, и ее движение прекращается.

Аналогичные процессы происходят, если на воду капнуть каплю анилина. Если поместить небольшую каплю анилина в спиртовой раствор воды, то при растворении анилина образуется структура, также очень напоминающая амёбу: она растёт, движется и выпускает «ложноножки», как бы ощупывающие окружающие предметы.

6.2.3. Движение кристаллов камфары по поверхности воды.

Изменение поверхностного натяжения может быть вызвано растворением в воде и твердых веществ, например, камфары. Камфара (камфора) представляет собой бесцветное кристаллическое вещество с достаточно сильным характерным запахом. Опыт показывается в проекции на экран.

В чисто вымытую чашку Петри нужно налить воду и насыпать на ее поверхность небольшое количество мелких кристаллов камфары (рис. 6.3). Они тут же приходят в бурное движение – быстро крутятся и перемещаются с места на место. Это, как и в предыдущей демонстрации, объясняется неравномерным растворением камфары с разных сторон кристаллов. По мере их растворения поверхность воды покрывается пленкой из камфары. После того, как эта пленка за-

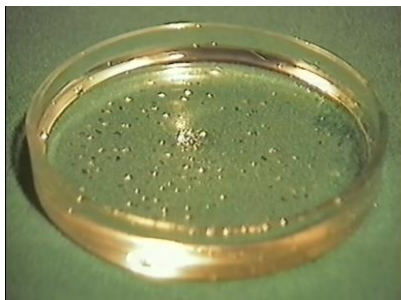


Рис. 6.3. Кристаллы камфары на поверхности воды.

нимает всю поверхность, коэффициент поверхностного натяжения жидкости по разные стороны от кристаллов становится одинаковым, и их движение прекращается.

Камфара является горючим и летучим веществом. В связи с этим ее нужно хранить вдали от источников огня в герметично закрытом флаконе (например, в пузырьке с притертой пробкой). Для того чтобы демонстрация хорошо получалась, камфара и внутренняя поверхность чашки Петри не должны быть жирными. Поэтому нельзя трогать внутреннюю поверхность вымытой чашки Петри руками, а камфару не следует брать из пузырька пальцами – это можно делать только при помощи чистого сухого ножа. Для опыта лучше использовать мелкие кристаллы камфары, которые можно получить, аккуратно дробя камфару в пузырьке кончиком ножа. Если во время лекции возникнет необходимость повторить демонстрацию, то перед этим обязательно нужно промыть чашку Петри в струе воды и насухо протереть ее со всех сторон чистой салфеткой.

6.2.4. «Живые» капли ртути.

Этот опыт является одним из самых красивых и впечатляющих среди обычно показываемых классических демонстраций, иллюстрирующих изменение поверхностного натяжения.

Чашку Петри нужно установить горизонтально и налить в нее раствор азотной кислоты крепостью ~20%. На дно чашки нужно поместить несколько капель чистой ртути различного размера. Если затем бросить в эту чашку несколько кристаллов хромпика (двухромовокислого калия $K_2Cr_2O_7$), то он начинает растворяться в азотной кислоте, окрашивая раствор вокруг кристаллов в оранжевый цвет (рис. 6.4). Когда этот оранжевый раствор доходит до кап-



Рис. 6.4. «Живые» капли ртути.

ли ртути, он вступает с ней в химическую реакцию. В этом месте поверхностное натяжение ртути сильно уменьшается, и капля приходит в быстрое движение – «бросается» на кристалл хромпика. Если размер капли невелик, то она как бы «присасывается» к кристаллу, постоянно дрожа и выбрасывая в раствор нерастворимый осадок. Если же

капля имеет большой размер, то она, достигнув кристалла, продолжает быстро двигаться и толкает кристалл перед собой, оставляя след из непрозрачных продуктов химической реакции. При наличии в чашке Петри нескольких капель ртути они движутся по чашке очень энергично. Из-за возникновения таких бурных движений демонстрация называется “«живые» капли ртути”.

Поверхность ртутных капель постепенно покрывается темным налетом, который препятствует дальнейшему протеканию реакции. Поэтому движение капель через некоторое время становится менее интенсивным, а затем вовсе прекращается. Если при помощи тонкой стеклянной палочки разбить каплю на две части, то каждая из частей вновь начнет быстро двигаться. Движение будет хорошо видно до тех пор, пока раствор окончательно не замутится продуктами реакции.

Проведение опытов со ртутью на лекциях не разрешается по правилам техники безопасности, поэтому данная демонстрация может быть показана только в видеозаписи.

6.3. Мыльные пузыри и плёнки.

Для демонстрации опытов с мыльными пленками необходим качественный мыльный раствор. Его можно изготавливать из мыльной стружки, шампуня, стирального порошка для ручной стирки (в количестве 2-3% от взятого количества воды). Такой мыльный раствор, как правило, пригоден для использования лишь на одной лекции. В литературе (например, в [1]) описан ряд более сложных рецептов изготовления мыльных растворов, которые могут храниться в течение длительного времени и позволяют получать устойчивые мыльные пленки и мыльные пузыри больших размеров². Также можно применять и раствор для пуска мыльных пузырей, продающийся в магазинах.

6.3.1. Работа мыльной плёнки.

Мыльная пленка, сокращая площадь своей поверхности, может совершать работу. Для демонстрации этого используется прямоугольная проволочная рамка, изготовленная из луженой медной проволоки. Одна из коротких сторон рамки делается в виде подвижной перемычки, для чего на концах образующей ее проволоки изгибаются колечки, которые надеваются на длинные стороны

² См. также: Бойс Ч. Мыльные пузыри. – М.; Л.: Детиздат, 1937.

рамки. Перемычка должна быть достаточно легкой, а к ее середине нужно припаять петельку или небольшой крючок. При показе демонстрации перемычку удерживают пальцами вблизи середины длинной стороны рамки и погружают рамку в мыльный раствор. В результате на каркасе, образованном тремя сторонами рамки и перемычкой, появляется мыльная пленка. При горизонтальном положении каркаса после оттягивания перемычки за привязанные к ней нитки пленка стремится сократить свою поверхность, и после отпускания ниток двигает перемычку в обратном направлении. При

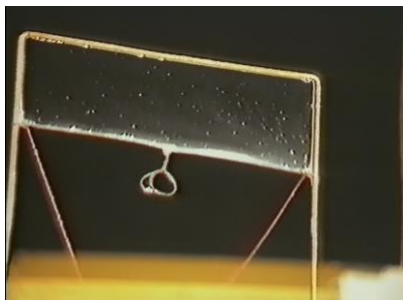


Рис. 6.5. Работа мыльной пленки.

вертикальном положении каркаса пленка после ее растягивания поднимает перемычку вверх, совершая работу против силы тяжести (рис. 6.5). Для большей убедительности можно прикрепить к петельке на перемычке небольшой грузик, который мыльная пленка, сокращаясь, будет поднимать вместе с перемычкой.

6.3.2. Плёнки на каркасах.

Стремление жидкости к сокращению площади своей поверхности можно наглядно продемонстрировать в опытах с мыльными пленками, образующимися на различных каркасах (рис. 6.6). Для показа опытов используются проволоочные кольца с привязанными к ним нитяными перемычками (одной и двумя), два одинаковых расположенных друг над другом кольца, которые можно раздвигать вдоль их оси, а также каркасы, сделанные в виде прямой трехгранной призмы, пирамиды с равносторонним основанием, куба и спирали (проволока наматывается по спирали вокруг образующей воображаемого цилиндра, а ее концы припаяваются к оси). Все каркасы изготовлены из луженой медной проволоки и снабжены ручками. Изображения получаемых мыльных пленок удобнее всего наблюдать на экране при помощи видеокамеры и проекционного аппарата.



Рис. 6.6. Проволочные каркасы.

Перед началом демонстрации нужно налить мыльный раствор в стакан и в чашку Петри подходящих размеров (каркасы должны в них полностью помещаться). Демонстрацию нужно начинать с показа мыльных пленок, образующихся на кольце с нитяной перемишкой. Кольцо нужно окунуть в мыльный раствор, налитый в чашку Петри, поднести его к видеокамере и обратить внимание зрителей на то, что нить не натянута и свободно лежит на поверхности мыльной пленки. Затем нужно проткнуть часть мыльной пленки (это можно сделать, например, при помощи ручки другого каркаса). После того, как часть пленки лопнет, нить натянется и примет форму дуги окружности (рис. 6.7). Далее нужно повторить этот эксперимент с кольцом, к которому прикреплены две перемишки. Нити, образующие перемишки, привязаны так, что плоскость каркаса делится ими на три части, а вблизи середины каркаса нити образуют замкнутую линию. Если проколоть часть мыльной пленки в области, ограниченной этой линией, то линия развернется в кольцо (рис. 6.8). Можно также последовательно прокалывать другие части мыльной пленки. При этом всякий раз участки нитей, которые граничили с лопнувшей пленкой, будут натягиваться и принимать форму дуги окружности.

После этого следует перейти к демонстрации мыльных пленок, образующихся на трехмерных каркасах. Вид получающихся пленок определяется силами поверхностного натяжения, которые стремятся максимально уменьшить площадь поверхности пленки.

Поэтому на каркасах, сделанных в виде правильных геометрических фигур, пленка располагается вдоль поверхностей, суммарная площадь которых минимальна. Эти поверхности, очевидно, не совпадают с воображаемыми гранями каркасов и образуют красивые пространственные структуры.

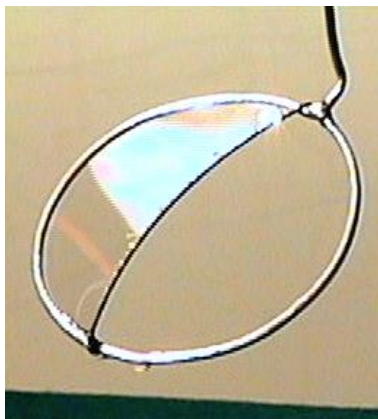


Рис. 6.7. Кольцо с одной нитяной перемычкой.



Рис. 6.8. Кольцо с двумя нитяными перемычками.



Рис. 6.9. Получение катеноида.

Сначала нужно продемонстрировать каркас, состоящий из двух одинаковых расположенных друг над другом колец. Кольца снабжены ручками и скреплены так, что их можно двигать друг относительно друга вдоль их оси. Если совместить эти кольца, окунуть их в стакан с мыльным раствором, проткнуть среднюю часть пленки внутри колец, а затем аккуратно раздвинуть их так, чтобы оси колец лежали на одной прямой, то получившаяся мыльная пленка (рис. 6.9) будет иметь вид поверхности вращения, называемой *катеноидом*. Немного поворачивая ручки, к которым прикреплены кольца, можно наблюдать, как при этом деформируется полученная мыльная пленка.

Заметим, что катеноид получил свое название от латинского слова *catena* (цепь) потому, что он может быть получен при вращении вокруг оси абсцисс кривой $y = a \operatorname{ch}(x/a)$, называемой *цепной линией*. Коэффициент a , равный радиусу пленки в ее наиболее узком месте, определяется из трансцендентного уравнения $R = a \operatorname{ch}(h/a)$, где R – радиус колец, $2h$ – расстояние между их плоскостями. Исследование этого уравнения показывает, что оно имеет решение только при условии $R/h > 1,51$. Это означает, что пленка между кольцами может образоваться только в том случае, если расстояние между ними не превышает $(2/1,51)R \approx 1,32R$. Данный вывод качественно подтверждается при показе демонстрации: при попытке развести кольца на значительное расстояние пленка лопается в наиболее узком месте и затягивает плоскости колец. Мыльная пленка в виде катеноида образуется между двумя кольцами лишь в случае, когда пленки, затягивающие плоскости колец, отсутствуют (то есть когда давление с внутренней и с внешней сторон поверхности катеноида одинаково). В противном случае боковая поверхность этой пленки может принимать самые разнообразные формы, в том числе образовывать цилиндрическую поверхность.

Катеноид, помимо прочих, обладает интересным и важным свойством, которое было найдено Ж. Мёнье³. Это свойство состоит в том, что любая часть поверхности катеноида, ограниченная некоторым воображаемым контуром, имеет меньшую площадь, чем любая другая поверхность, ограниченная этим же контуром. Таким образом, катеноид принадлежит к классу так называемых *минимальных поверхностей* и является единственным представителем этого класса среди поверхностей вращения. Все поверхности мыльных пленок, образующиеся на различных каркасах, как раз являются минимальными. Примеры таких поверхностей можно показать, последовательно продемонстрировав пленки, которые образуются при окунании в стакан с мыльным раствором каркасов, сделанных в виде прямой трехгранной призмы, пирамиды с равносторонним основанием, куба и спирали (рис. 6.10 – 6.13). Получающиеся пленки имеют довольно сложные формы. Так, например, на каркасе, сделанном в виде спирали, образуется пленка, поверхность которой близка к участку *геликоида* (геликоидом называется мини-

³ Ж. Б. М. Ш. Мёнье де ла Плас (1754 – 1793) – французский математик, член Парижской академии наук. Считается изобретателем дирижабля.

мальная поверхность, образуемая при винтовом движении горизонтальной прямой, пересекающей вертикальную ось).



Рис. 6.10. Мыльная пленка на каркасе в виде прямой трехгранной призмы.



Рис. 6.11. Мыльная пленка на каркасе в виде пирамиды с равносторонним основанием.

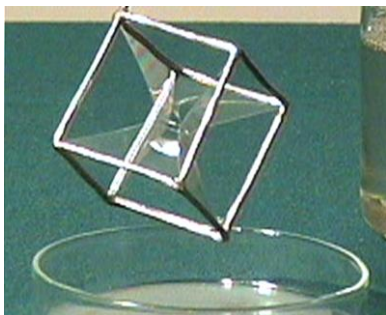


Рис. 6.12. Мыльная пленка на каркасе в виде куба.

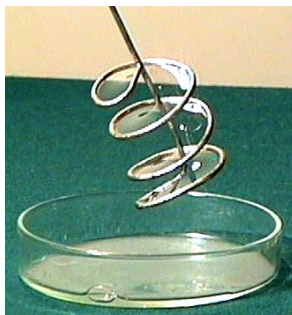


Рис. 6.13. Мыльная пленка на каркасе в виде спирали (геликоид).

При показе опыта нужно иметь в виду, что на некоторых каркасах пленки могут принимать устойчивую форму не сразу. В этом случае каркас, вынутый из мыльного раствора, нужно слегка встряхнуть. После окончания показа демонстрации проволочные каркасы необходимо тщательно вымыть и просушить.

6.3.3. Зависимость давления в мыльном пузыре от его радиуса.

Демонстрируется зависимость давления в мыльном пузыре от его радиуса. Установка представляет собой стеклянную трубку, на которой имеются два крана и две воронки, одна из которых находится на конце трубки, а вторая сделана вблизи ее середины. К другому концу трубки подсоединен шланг со стеклянной насадкой на конце, служащий для подачи в установку воздуха. Воронки имеют ориентированные в одну сторону круглые сечения диаметром около 30 мм и служат для выдувания мыльных пузырей. Один из кранов расположен посередине трубки между воронками и позволяет отсекал мыльные пузыри друг от друга. Второй кран находится у конца трубки и служит для ее отсоединения от шланга. Краны смазаны вакуумной смазкой. Установка крепится на штативе при помощи зажима таким образом, чтобы воронки были направлены вниз.

Для показа демонстрации нужно открыть оба крана, налить в чашку Петри мыльный раствор, и, взяв ее в руки, поочередно погрузить в раствор края обеих воронок. Затем, сделав глубокий вдох, поместить стеклянную насадку в рот и выдуть через воронки два примерно одинаковых мыльных пузыря радиусом 5-7 см. После этого нужно перекрыть средний кран, отсоединив крайний пузырь от трубки, и продолжать надувать второй пузырь до тех пор, пока он не увеличится примерно вдвое. Затем перекрыть второй кран, аккуратно открыть средний кран, соединив пузыри друг с другом, и наблюдать рост большого пузыря и уменьшение маленького до практически полного исчезновения последнего (см. рис. 6.14).



Рис. 6.14. Демонстрация зависимости давления в мыльном пузыре от его радиуса.

Наблюдаемое явление объясняется тем, что в соответствии с формулой Лапласа⁴ давление под искривленной поверхностью жидкости обратно пропорционально радиусу кривизны поверхности. Следовательно, давление воздуха внутри маленького пузыря больше, чем внутри большого. Поэтому после соединения двух пузырей различного радиуса воздух начинает перетекать из меньшего пузыря в больший. При этом радиус маленького пузыря уменьшается, а радиус большого – увеличивается, благодаря чему давление в маленьком пузыре возрастает, а в большом – уменьшается. Таким образом, процесс перетекания воздуха из пузыря в пузырь, начавшись, идет все быстрее и быстрее до тех пор, пока маленький пузырь не вырождается в небольшой сферический сегмент мыльной пленки, затягивающей одну из воронок и имеющей тот же радиус кривизны, что и оставшийся большой пузырь.

С установкой нужно обращаться очень бережно, чтобы не разбить ее. Показывать опыт нужно в отсутствие сквозняка. Не следует проводить демонстрацию с пузырями, радиусы которых близки; в этом случае давление внутри пузырей будет слабо различаться, и демонстрация будет проходить достаточно долго. При выдувании пузырей нужно следить, чтобы они не коснулись друг друга. Если при показе демонстрации пузыри случайно лопнут или если потребуется показать опыт на лекции вторично, то перед повторным показом края воронок нужно предварительно насухо протереть.

6.4. Капиллярные явления.

6.4.1. Подъем жидкости в капиллярных трубках.

В хорошо смачиваемых капиллярах вода поднимается тем выше, чем меньше их радиус (высота поднятия обратно пропорциональна радиусу капилляра). Это демонстрируется при помощи набора из нескольких различных стеклянных капиллярных трубок.

Несколько (5-6) капилляров закреплены в порядке уменьшения их внутренних диаметров на специальном держателе так, что их нижние концы находятся на одинаковом уровне, а сами капилляры лежат в одной плоскости. Для демонстрации рекомендуется использовать раствор флуоресцеина или ярко окрашенный раствор марганцовокислого калия (KMnO_4), который наливается в чашку

⁴ П.-С. Лаплас (1749 – 1827) – французский математик, физик и астроном, член шести Академий наук и Королевских обществ, в том числе иностранный почетный член Петербургской Академии наук.

Петри. Вместо чашки Петри можно использовать прямоугольный стакан с параллельными стенками (в этом случае держатель кладется на края стакана). Для подготовки и показа демонстрации необходимы спринцовка с наконечником и надетым на него кусочком шланга, а также небольшое количество этилового спирта и чистая вода. Изображение капилляров с поднявшейся в них жидкостью проецируется на экран при помощи видеокамеры и проекционного аппарата. Позади капилляров на небольшом расстоянии от них рекомендуется установить белый экран, служащий во время демонстрации фоном, улучшающим условия наблюдения.

При показе демонстрации нужно закрепить набор капилляров так, чтобы они были вертикальны, а их концы были погружены в раствор, налитый в чашку Петри (или в стакан). Далее при помощи спринцовки нужно поочередно засасывать в капилляры раствор таким образом, чтобы он смочил капилляры по всей их длине. Это нужно делать, аккуратно надевая кусочек шланга, которым снабжена спринцовка, на верхний конец капилляра и прижимая срез шланга к верхней гладкой плоскости держателя. При этом внутренний объем спринцовки оказывается герметично соединенным с капилляром, что позволяет засасывать в него жидкость. После убирания спринцовки уровень жидкости в капилляре будет устанавливаться в положении равновесия. Следует обратить внимание зрителей на то, что в капиллярах различного диаметра жидкость поднимается на разные высоты, причем высота поднятия жидкости тем больше, чем тоньше капилляр (рис. 6.15). Используя спринцовку, нужно продемонстрировать, что уровни жидкости в капиллярах после выведения из положения равновесия вновь устанавливаются на прежней высоте.

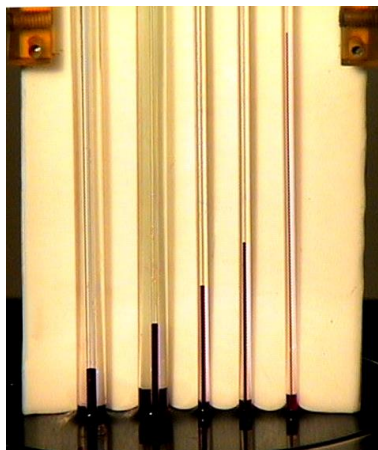


Рис. 6.15. Подъем жидкости в капиллярных трубках.

Если для проведения опыта применяется раствор марганцовокислого калия, то он должен быть тщательно отфильтрован. Если в каком-то капилляре имеются загрязнения, то правильный уровень воды устанавливается в нем только после продувки. После показа

демонстрации капилляры нужно тщательно промывать водой и спиртом для того, чтобы удалить из них загрязнения и следы жира. В случае если внутри капилляров по каким-либо причинам оказывается твердый осадок, не смываемый водой и спиртом, то капилляры нужно аккуратно промыть концентрированным раствором царской водки (смесью серной и азотной кислоты с небольшим добавлением воды), а затем вновь водой и спиртом. После этого капилляры нужно продуть и просушивать, чтобы в них не оставалось жидкости, которая после испарения оставит отложения солей на стенках.

6.4.2. Подъем жидкости в клине.

Для демонстрации используется вертикальная кювета в виде треугольной призмы, склеенная из стеклянных пластинок (в плане она имеет вид равнобедренного треугольника с малым углом при вершине). В кювету наливается ярко окрашенный раствор марганцовокислого калия (KMnO_4) или раствор флуоресцеина. Изображение кюветы с находящейся в ней жидкостью наблюдается на экране при помощи видеокамеры и проекционного аппарата. Позади кюветы на небольшом расстоянии от нее рекомендуется установить белый экран, служащий во время демонстрации фоном, улучшающим условия наблюдения. Перед показом демонстрации кювету необходимо тщательно вымыть водой и обезжирить ее внутренние стенки спиртом, обращая особое внимание на участки стекла, находящиеся вблизи малого угла кюветы. Для доступа к наиболее узкой части кюветы при необходимости можно использовать смоченные в спирте полоски бумаги. Затем кювету нужно тщательно просушить потоком воздуха.

При демонстрации опыта нужно поставить кювету на предметный столик и налить в нее раствор марганцовокислого калия

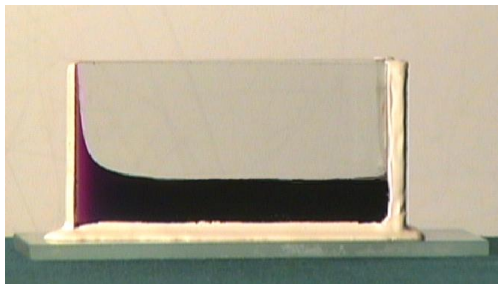


Рис. 6.16.
Подъем жидкости в клине.

или флуоресцеина примерно до $1/4$ ее высоты. Наклонить кювету в сторону ее узкой части так, чтобы жидкость смочила острый угол кюветы вдоль всей ее высоты, после чего аккуратно вернуть дно кюветы в горизонтальное положение. Водный

раствор марганцовокислого калия смачивает стекло. Поэтому под действием сил поверхностного натяжения раствор вблизи острого угла кюветы поднимется и займет такое положение, при котором сумма капиллярных сил и сил гидростатического давления, действующих на каждый малый элемент поверхности, обращается в ноль. Можно показать, что профиль поверхности жидкости вблизи малого угла кюветы при этом принимает форму гиперболы (рис. 6.16), на что и следует обратить внимание зрителей.

Затем полезно продемонстрировать видеозапись аналогичного эксперимента, в котором опыт проводится одновременно с двумя несмешивающимися жидкостями разной плотности: подкрашенной флуоресцеином водой, смачивающей стекло, и несмачивающей его ртутью (опыты со ртутью могут демонстрироваться только в видеозаписи). В этом случае будет наблюдаться картина, показанная на рис. 6.17 – водный раствор флуоресцеина будет подниматься вблизи угла кюветы, а ртуть – опускаться.

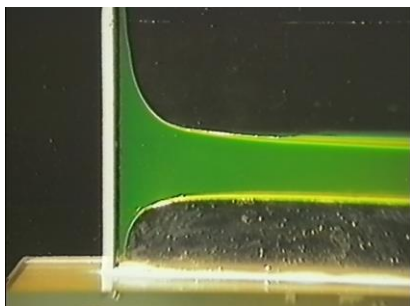


Рис. 6.17.

Водный раствор флуоресцеина и ртуть в клиновидной кювете.

После окончания демонстрации кювету нужно немедленно тщательно промыть чистой водой, а затем спиртом, и просушить. После того, как кювета вымыта и высушена, не следует прикасаться к ее поверхности пальцами. На время хранения кювету следует прикрывать сверху от пыли стеклянной пластинкой.

6.4.3. Капиллярные силы (притяжение стеклянных пластинок).

Установка представляет собой две круглые стеклянные пластинки, к одной из которых приклеена ручка (см. рис. 6.18). Для того чтобы демонстрация хорошо получалась, пластинки перед показом опыта следует промыть и насухо протереть.

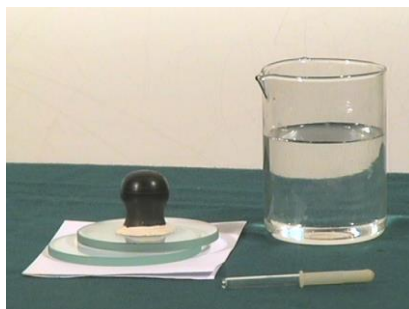


Рис. 6.18. Притяжение стеклянных пластинок.

Во время демонстрации нужно сначала взять одну из пластинок за ручку и прижать ее сверху ко второй пластинке, лежащей на столе. Приподнимая пластинку с ручкой, показать, что пластинки не слипаются – нижняя пластинка остается лежать на столе (либо немного приподнимается и тут же падает вниз). Затем нужно капнуть на нижнюю пластинку одну-две капли воды из пипетки, не очень сильно сжать пластинки так, чтобы вода растеклась по всей их поверхности, и поднять слипшиеся пластинки, удерживая их в горизонтальном положении и держа под ними на некотором расстоянии ладонь руки. Аккуратно наклоняя верхнюю пластинку с ручкой в разные стороны, продемонстрировать, что нижняя пластинка при этом под действием силы тяжести начинает скользить в сторону наклона. Затем снова сжать пластинки, но уже сильно, и показать, что после этого они не сдвигаются вбок при наклонах.

Наблюдаемые явления объясняются тем, что капля воды, раздавленная между двумя стеклянными пластинками, смачивает их и растекается между пластинками тонким слоем. На границе с воздухом поверхность этого слоя искривлена и вогнута в направлении от краев пластинок в сторону их центра. За счет малого радиуса кривизны этой поверхности давление между пластинками становится существенно ниже атмосферного, которое на большой площади растекшейся капли прижимает пластинки и стягивает их. В то же время пластинки контактируют только с водой, а не друг с другом, и легко сдвигаются вбок, параллельно своим плоскостям. Поэтому оторвать пластинки друг от друга, прикладывая усилие в направлении, перпендикулярном их плоскости, достаточно тяжело, а при небольшом наклоне нижняя пластинка сама свободно съезжает вдоль поверхности верхней пластинки под действием силы тяжести. Если же сжать пластинки сильно, то они сдавливаются вплоть до касания мелких неровностей на их обеих поверхностях, и после этого возникающие силы сухого трения между пластинками не дают им сдвигаться вбок при наклонном положении пластинок.

Демонстрацию рекомендуется показывать, подкладывая на стол под нижнюю пластинку лист белой бумаги, который предохраняет пластинки от имеющейся на столе грязи, и, кроме того, делает прозрачные пластинки хорошо видимыми. При показе нужно обязательно держать на некотором расстоянии под пластинками ладонь с тем, чтобы нижняя пластинка в случае ее падения не разбилась. Можно вместо этого проводить демонстрацию над мягкой подстилкой, например, над куском толстой материи. После окон-

чания демонстрации необходимо тщательно протереть пластинки сухой салфеткой, очистив их от воды и пыли. Затем пластинки нужно немного подсушить, сложить их друг с другом навстречу рабочими поверхностями и убрать для хранения.

6.4.4. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры.

Известно, что коэффициент поверхностного натяжения жидкостей уменьшается с ростом температуры. Это демонстрируется следующим образом.

На аудиторный стол нужно поставить штатив и при помощи зажима-«лапки» закрепить на нем капилляр с открытыми концами, зажав его за втулку, надетую на один из его концов. Подсоединить к концу капилляра спринцовку и немного ослабить крепление зажима так, чтобы «лапка» могла поворачиваться. Придерживая капилляр со спринцовкой рукой, перевести его в вертикальное положение и с помощью спринцовки промыть весь капилляр спиртовым раствором чернил в воде. Затем набрать в капилляр небольшое количество спиртового раствора (столбик жидкости в капилляре должен иметь длину 5-7 см) и аккуратно перевести капилляр в горизонтальное положение. Отсоединить от капилляра спринцовку и, немного наклоня капилляр, добиться, чтобы жидкость покоилась вблизи его середины, после чего зафиксировать «лапку». При помощи видеокамеры, осветителя и проекционного аппарата получить на экране контрастное хорошо освещенное изображение капилляра с подкрашенной жидкостью.

Затем нужно включить термопистолет (или зажечь зажигалку) и начать нагревать капилляр вблизи одного из концов столбика подкрашенной жидкости (см. рис. 6.19). Через 10-15 секунд жидкость начнет двигаться в сторону более холодной части капилляра. После этого нужно прекратить нагревание и осторожно охладить капилляр, протирая его тряпочкой, смоченной в холодной воде. Далее следует вновь нагреть капилляр вблизи

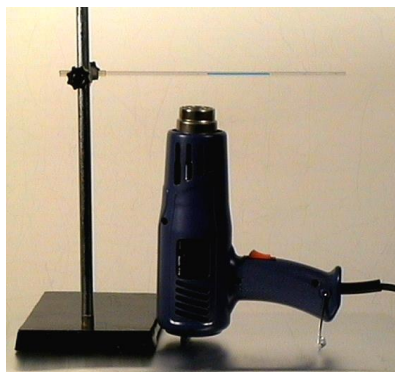


Рис. 6.19. Демонстрация зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры.

другого конца столбика жидкости, демонстрируя, что он будет двигаться в обратную сторону.

Наблюдаемые явления объясняются тем, что спиртовой раствор чернил в воде хорошо смачивает стекло, и поэтому в горизонтальном капилляре эта жидкость располагается в виде столбика, на концах которого образуются мениски, вогнутые в сторону жидкости. При нагревании капилляра температура жидкости вблизи одного из менисков повышается, и коэффициент ее поверхностного натяжения в этом месте уменьшается. Это приводит к уменьшению капиллярных сил, действующих на столбик жидкости с подогреваемой стороны, по сравнению с капиллярными силами, действующими с холодного конца. Вследствие этого жидкость начинает двигаться в сторону холодной части капилляра. Такое движение продолжается до тех пор, пока столбик жидкости не сместится в ту часть капилляра, где температуры менисков (а следовательно, и капиллярные силы) примерно одинаковы.

Данный эффект проявляется, например, при сушке обуви. Если подогревать мокрую обувь снаружи, то жидкость будет двигаться по ее порам в менее нагретую сторону, то есть внутрь, и по этой причине обувь будет сохнуть очень медленно. Для того чтобы ускорить процесс высыхания, нужно подогревать обувь изнутри. В этом случае вода будет выходить из нее наружу и интенсивно испаряться.

После окончания показа опыта капилляр нужно тщательно промыть, продуть и просушить. Во избежание ожогов нельзя прикасаться к разогретому капилляру.

Следует иметь в виду, что основная сложность при подготовке данной демонстрации заключается в придании капилляру с набранной в него жидкостью строго горизонтального положения, так как при малейшем наклоне капилляра столбик жидкости вытекает из него под действием силы тяжести. Поэтому наладка этой демонстрации требует особой тщательности.

6.5. Смачивание и несмачивание.

6.5.1. Всплывание поплавка.

Смачивание твердого тела жидкостью можно наглядно продемонстрировать при помощи следующего опыта. К верхней части цилиндрического поплавка, изготовленного из тонкой листовой жести, при помощи трех металлических усиков прикреплено проволочное кольцо. Нижняя часть поплавка утяжелена грузиком.

Масса грузика подобрана так, чтобы поплавок свободно держался на воде, будучи почти полностью погруженным в нее. При этом плоскость кольца должна располагаться горизонтально, находясь чуть выше уровня воды.



Рис. 6.20. Всплытие поплавка.

Если аккуратно утопить поплавок так, чтобы плоскость кольца, сохраняя горизонтальность, оказалась чуть ниже уровня воды, а потом медленно отпустить поплавок, то кольцо, смоченное водой, не сможет «прорвать» водную поверхность, и поплавок останется в погруженном состоянии, удерживаемый силами поверхностного натяжения (рис. 6.20, слева). Если затем слегка наклонить поплавок, чтобы край кольца оторвался от поверхности воды, а затем отпустить его, то поплавок вновь всплывет и вернется в исходное положение равновесия. Можно заставить поплавок всплыть и другим способом – если капнуть на поверхность воды вблизи проволочного кольца немного эфира, то поверхностное натяжение воды уменьшится и уже не сможет удерживать поплавок под водой (рис. 6.20, справа).

Для того чтобы опыт хорошо получался, проволока, из которой сделано кольцо, должна хорошо смачиваться водой. По этой причине ее, в частности, не рекомендуется красить.

6.5.2. Вода в «решете» (парафинированное сито).

Если жидкость плохо смачивает пористый материал, то она не будет протекать сквозь него, пока в порах сохраняются участки

поверхностной пленки жидкости с малыми радиусами кривизны. Для иллюстрации этого факта демонстрируется парафинированное сито, которое можно изготовить, натерев твердым парафином обычное сито и затем слегка подогрев его в струе горячего воздуха от термопистолета или фена до расплавления парафина.

Для показа демонстрации рекомендуется использовать два внешне одинаковых металлических чашеобразных сита – обычное и парафинированное – с приклепанными к ним ручками. Желательно, чтобы края сит были снабжены гладкими ободками. Сита при помощи зажимов крепятся на штативе так, чтобы эти ободки были горизонтальны (сита при этом должны располагаться по разные стороны от стойки штатива, см. рис. 6.21). Вся конструкция ставится в поддон для сбора воды. Изображения сит наблюдаются на экране при помощи видеокамеры и проекционного аппарата.



Рис. 6.21. Демонстрация парафинированного сита.

При показе демонстрации нужно взять стакан с водой и начать аккуратно наливать из него воду в обычное сито. Вода должна вытекать из носика стакана тонкой струйкой, попадать на прикрепленный к ситу металлический ободок, а с него стекать в сито. При этом будет видно, что вся попавшая в сито вода свободно проходит через него и сливается в поддон, поскольку металлическое сито хорошо смачивается водой.

Для того чтобы убедиться в том, что вода в сите не остается, нужно прекратить заливку воды, провести по дну сита снизу пальцем и продемонстрировать, что из сита ничего не вытекает.

Затем нужно начать аккуратно наливать описанным способом воду в парафинированное сито и продемонстрировать, что вода не протекает через сито, а скапливается на его дне в виде лужицы (рис. 6.22, слева). Сито можно наполнить водой почти наполовину, после чего следует прекратить заливку воды и, коснувшись дна сита снизу пальцем, продемонстрировать, что вода начнет вытекать из сита (рис. 6.22, справа) и вся вытечет. Для большей убе-

длительности можно вынуть парафинированное сито из зажима на штативе, стряхнуть с него капли, вернуть сито на место и повторить опыт.

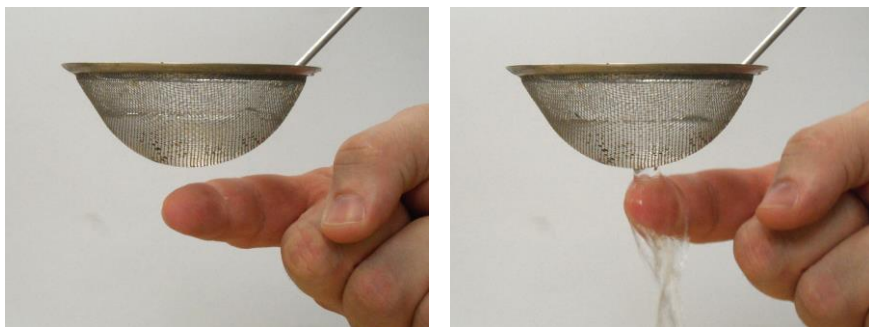


Рис. 6.22. Вода в парафинированном сите.

Объяснение опыта состоит в том, что парафин, который покрывает проволочное сито, не смачивается водой, и поэтому в просветах ячеек парафинированного сита образуются участки поверхности воды с малыми радиусами кривизны. Давление под искривленной поверхностью воды, обусловленное силами поверхностного натяжения, уравнивает гидростатическое давление столба налитой в сито жидкости и препятствует ее вытеканию. После касания нижней поверхности сита пальцем, который хорошо смачивается водой, капли воды над пальцем прилипают к коже, проникают сквозь сито, сливаются друг с другом и образуют одну поверхность с существенно большим радиусом кривизны. Давление под этой поверхностью, обусловленное силами поверхностного натяжения, уменьшается, и вода под действием гидростатического давления начинает вытекать из сита. В пользу истинности такого объяснения демонстрации говорит то, что воду в сито никогда не удастся налить выше определенного уровня – она начинает протекать через ячейки сразу после того, как гидростатическое давление превышает лапласовское.

Для успеха показа демонстрации существенно, чтобы вода при наливании в сито медленно стекала по его внутренней поверхности, а не лилась в него струей, которая при торможении создает дополнительное давление и может пробить поверхностную пленку, удерживающую воду в сите.

6.5.3. Капли керосина и ртути на стекле.

Форма капель жидкости на твердой поверхности зависит от характера ее смачивания этой жидкостью. Для демонстрации этого на горизонтальную стеклянную пластинку капают керосин и ртуть. Керосиновые и ртутные капли должны иметь разные размеры. Поскольку керосин хорошо смачивает стекло, его капли широко растекаются по пластинке, становясь почти плоскими, и имеют при этом разную площадь. Ртуть, наоборот, не смачивает стекло, и по-

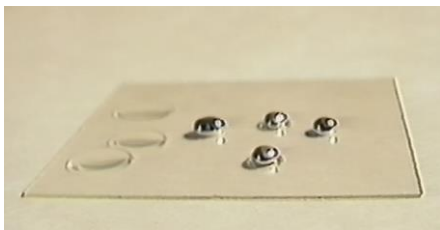


Рис. 6.23. Капли керосина и ртути на стекле.

этому ее капли не растекаются по пластинке: маленькие капли принимают форму, близкую к сферической, а капли большого размера стремятся превратиться в шары, но немного сплюсываются под действием силы тяжести (см. рис. 6.23).

Проведение опытов со ртутью на лекциях не разрешается по правилам техники безопасности, поэтому данная демонстрация может быть показана только в видеозаписи.

6.5.4. Плавание парафинированного диска с грузом на поверхности воды.

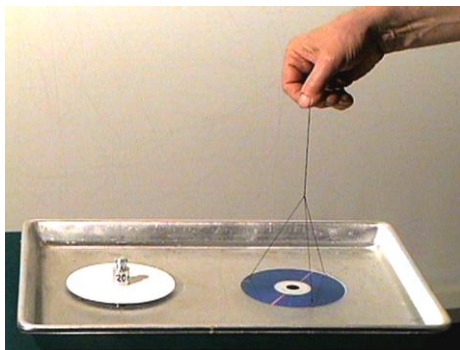


Рис. 6.24. Плавание парафинированных дисков на поверхности воды.

Силы поверхностного натяжения могут играть важную роль при поддержании плавания тел, плотность которых больше, чем у жидкости, в случае, если жидкость не смачивает твердое тело. Для демонстрации этого факта используются два стандартных компакт-

диска с диаметром 120 мм и средней плотностью немного большей, чем у воды (рис. 6.24). У обоих дисков центральное отверстие закрыто пластмассовыми вставками, а одна из сторон заклеена полимерной

пленкой. Диски натерты парафином: один с обеих сторон, а другой – только со стороны, заклеенной пленкой. К этому диску с непокрытой парафином стороны приклеены нити трифилярного подвеса. Демонстрация показывается в проекции на экране, получаемой при помощи видеокамеры и проекционного аппарата.

В начале демонстрации следует взять диск, снабженный трифилярным подвесом, и, удерживая нить подвеса в руке, утопить диск в воде, налитой в плоский поддон. Обратить внимание зрителей на то, что утонувший диск лежит на дне поддона и не всплывает (это доказывает, что его плотность превышает плотность воды). Затем нужно, потянув за подвес, приподнять диск так, чтобы чуть больше половины его

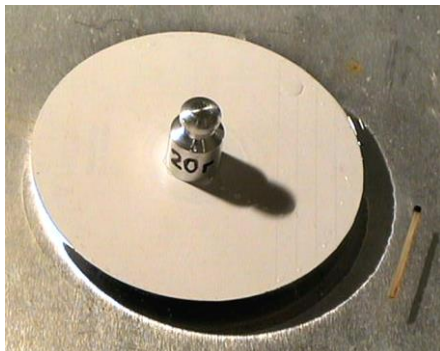


Рис. 6.25.

Плавание парафинированного диска с гирькой и отталкивание от него спички, смоченной водой.

верхней плоскости оказалось над водой. Продемонстрировать, что из такого положения диск полностью всплывает и остается лежать на поверхности воды, причем почти вся вода с поверхности диска стекает в поддон. Далее нужно положить на поверхность воды второй диск и аккуратно поставить на его середину гирьку (рис. 6.25). Обратить внимание зрителей на то, что поверхность воды у краев плавающего диска с гирькой заметно прогнулась (для этого, возможно, придется подвигать диск вдоль поверхности воды). Затем нужно при помощи пинцета аккуратно сблизить оба плавающих диска и продемонстрировать, что на малом расстоянии они притягиваются друг к другу.

В завершение демонстрации нужно вынуть диск с трифилярным подвесом из воды, а вместо него положить на воду две спички, хорошо смоченные водой. Аккуратно подтолкнув их друг к другу пинцетом, продемонстрировать притягивание спичек. Потом подтолкнуть одну из спичек к диску, оставшемуся плавать на поверхности воды, и показать, что они отталкиваются (см. рис. 6.25).

Натертый парафином тяжелый диск плавает на поверхности воды потому, что практически не смачивается водой. Из-за этого

поверхность воды вблизи края диска как бы «отталкивается» от него, выгибаясь вниз, и вода не затекает на верхнюю плоскость диска даже тогда, когда диск немного притоплен под весом поставленной на него гирьки и целиком находится ниже уровня поверхности воды. Следует отметить, что диск удерживается на поверхности воды не силами поверхностного натяжения, а, в основном, силой гидростатического давления, которая возникает благодаря тому, что верхняя поверхность диска не покрыта водой, а нижняя находится заметно (на $\Delta h \sim 2,5 \div 3$ мм) ниже поверхности воды в поддоне. Вследствие этого на диск действует выталкивающая сила $\rho g \Delta h S$, где ρ – плотность воды, $S = \pi d^2/4$ – площадь нижней поверхности диска диаметром d . Простая оценка показывает, что эта сила для используемого в данной демонстрации диска диаметром 120 мм составляет $\sim 0,3$ Н, в то время как сила поверхностного натяжения $\pi d \sigma$ ($\sigma \approx 0,072$ Н/м – коэффициент поверхностного натяжения воды) не превышает $\sim 0,03$ Н. Следовательно, сила поверхностного натяжения, величина которой примерно в 10 раз меньше силы гидростатического давления, в одиночку не может обеспечить плавание диска с гирькой. Роль поверхностного натяжения в данном случае сводится к тому, что оно препятствует затеканию воды на верхнюю плоскость притопленного диска, что и создает условия для появления поддерживающей диск силы гидростатического давления. Приведенные оценки показывают, что максимальная нагрузка, при которой используемый в данной демонстрации диск еще не тонет, составляет ~ 30 г, что подтверждается экспериментом.

Притяжение друг к другу несмачиваемых или смачиваемых тел, плавающих на поверхности воды, объясняется тем, что площадь поверхностной пленки между ними при их сближении уменьшается. Аналогичным образом объясняется сближение в большие группы пузырьков воздуха, листьев, мелкого мусора и других смачиваемых тел, плавающих на поверхности воды в стоячих водоемах. При сближении же смачиваемых и несмачиваемых тел они, напротив, отталкиваются.

Глава 7 РАСТВОРЫ

Растворами называются физически однородные смеси двух или нескольких веществ [11]. Демонстрации, иллюстрирующие свойства растворов, следует показывать после рассмотрения свойств чистых жидкостей и фазовых переходов [1, 4].

7.1 Взаимное растворение жидкостей (уменьшение объема при смешивании воды с ацетоном или спиртом).

Как известно, объем не является аддитивной величиной – при смешивании различных веществ объем смеси не всегда равен сумме объемов составляющих ее исходных частей. Это можно показать на примере смешивания воды с ацетоном или спиртом.

Для демонстрации используется вертикальная стеклянная трубка длиной около 1 м, нижний конец которой запаян, а верхний открыт и может затыкаться резиновой пробкой (см. рис. 7.1). На трубку вблизи ее середины и на расстоянии 5–7 см от затыкаемого конца надеты два узких резиновых кольца, играющих роль меток. Трубка крепится в штативе. Для демонстрации используются подкрашенная вода и ацетон или спирт.

В начале опыта нужно вставить в открытую часть трубки воронку и залить через нее в трубку подкрашенную воду до уровня отметки на середине трубки. Затем нужно аккуратно залить в трубку поверх воды чистый ацетон или спирт так, чтобы его уровень дошел до верхней отметки. Начинать заливку ацетона или спирта нужно



Рис. 7.1. Уменьшение объема при смешивании воды с ацетоном или спиртом.

очень медленно и осторожно, чтобы он как можно меньше смешивался с залитой ранее водой. После этого надо плотно заткнуть трубку резиновой пробкой, вынуть трубку из зажимов и несколько раз перевернуть ее запаянным концом вверх и обратно, каждый раз дожидаясь, пока находящийся в трубке воздушный пузырь проплывет снизу вверх вдоль всей ее длины. Когда вода и ацетон или спирт достаточно хорошо перемешаются, что будет видно по более или менее равномерной окраске раствора, нужно вновь закрепить трубку на штативе в первоначальном положении и продемонстрировать, что уровень смеси опустился ниже исходной отметки на 2-3 см, то есть суммарный объем жидкости уменьшился.

Результат опыта объясняется тем, что плотность вещества зависит как от рода составляющих его атомов или молекул, так и от их взаимного расположения (способа «упаковки»). Так как молекулы в жидкостях не имеют строго определенных положений равновесия и могут перемещаться, перескакивая из одного места в другое, то может оказаться, что при смешивании различных жидкостей «упаковка» молекул в растворе окажется более компактной, чем она была в каждой из исходных чистых жидкостей. Вследствие этого плотность раствора увеличится по сравнению со средней плотностью составляющих его жидкостей, а суммарный объем раствора – уменьшится. В демонстрируемом эксперименте причиной повышения плотности «упаковки» молекул является образование водородных связей между молекулами воды H_2O и ацетона CH_3COCH_3 или спирта $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Водородная связь образуется тогда, когда один из атомов водорода, входящих в молекулу воды, оказывается между двумя атомами кислорода, принадлежащими молекулам воды и ацетона или спирта. При этом электронная плотность на линии связи $\text{O}-\text{H}-\text{O}$ смещается в сторону более электроотрицательного атома кислорода, «оголяя» протон водорода, что способствует сближению электроотрицательных атомов соседних молекул воды и ацетона или спирта. Вследствие этого расстояние между атомами кислорода уменьшается практически до суммы их ван-дер-ваальсовских атомных радиусов, то есть атомы кислорода ведут себя так, как будто между ними нет атома водорода. Таким образом, водородная связь как бы «стягивает» молекулы, располагая их более плотно, чем в чистых воде или ацетоне (или спирте), что и приводит к уменьшению объема при смешивании. Следовательно, данный эксперимент можно рассматривать как одно из доказательств того, что жидкости состоят из отдельных молекул,

которые могут двигаться и образовывать друг с другом различные комбинации, что проявляется в виде макроскопического эффекта.

Используемая для демонстрации вода должна быть подкрашена не очень сильно. Для подкрашивания можно использовать метиленовую синьку (краситель «метиленовый голубой», $C_{16}H_{18}ClN_3S \cdot 3H_2O$), либо чайную заварку. Вместо ацетона для демонстрации можно применять какой-либо спирт. После показа демонстрации трубку нужно тщательно вымыть и на некоторое время закрепить открытым концом вниз для того, чтобы из нее вытекли остатки воды.

7.2. Диффузия раствора двуххромовокислого калия в воде.

Процесс диффузии заключается во взаимном проникновении молекул одного вещества в другое. Диффузия описывается законом Фика¹, в соответствии с которым диффузионный поток молекул вещества пропорционален градиенту концентрации этого вещества. Поскольку система, в которой контактируют два разных вещества, из-за своей неоднородности является неравновесной, то процесс диффузии приводит к постепенному выравниванию концентраций этих веществ. При этом вещества перемешиваются, и диффузия идет тем медленнее, чем сильнее они перемешались, то есть чем меньше текущий градиент концентрации. Поэтому на начальной стадии процесса, когда между веществами есть резкая граница, процесс диффузии идет настолько быстро, что его можно непосредственно наблюдать в течение сравнительно небольшого промежутка времени (например, в течение одной лекции), а затем диффузия постепенно замедляется так, что для визуального обнаружения изменения концентрации требуются дни. Эти процессы, качественно поясняющие основные закономерности диффузии, можно проиллюстрировать, продемонстрировав диффузию раствора двуххромовокислого калия $K_2Cr_2O_7$ (хромпика) в воде.

Хромпик представляет собой ярко-оранжевые кристаллы и продается, как правило, в виде порошка. Этот порошок засыпается в пакетик из-под чайной заварки, который закрывается и одновременно утяжеляется при помощи канцелярской скрепки (скрепка должны быть настолько массивной, чтобы пустой пакетик после полного растворения порошка не всплывал). Этот пакетик кладется

¹ А. Фик (1829 – 1901) – выдающийся немецкий физиолог, в 1855 г. дал количественное описание процессов диффузии.

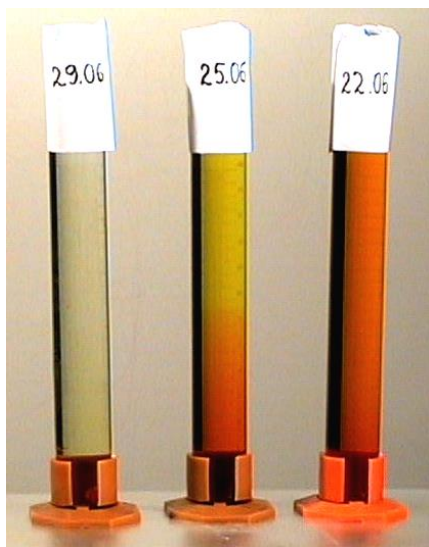


Рис. 7.2.

Диффузия двуххромовокислого
калия в воде.

в мензурку (мерный стакан), в которую затем наливается вода. Вода должна быть хорошо отстоявшейся (или дистиллированной) и иметь комнатную температуру для того, чтобы исключить перемешивание раствора при подъеме пузырьков выделяющегося из воды воздуха и не допустить интенсивного растворения кристаллов. Воду нужно заливать быстро, чтобы за время существования в ней гидродинамических потоков хромпик не успел заметным образом раствориться. После этого можно наблюдать диффузию раствора двуххромовокислого калия в воде.

Поскольку диффузия является медленным процессом, то для показа ее различных стадий нужно одновременно демонстрировать три мензурки, в которые хромпик был помещен в разное время – за один, три-четыре и семь-восемь дней до показа (см. рис. 7.2). Для большей наглядности рекомендуется надеть на каждую мензурку бумажный колпачок, на котором написана дата начала процесса диффузии (эти колпачки, кроме того, замедляют испарение воды из мензурки).

Подготовка демонстрации сильно упрощается в том случае, если в распоряжении демонстратора имеются крупные (размером ~4-5 мм и больше) кристаллы хромпика. В этом случае при подготовке опыта в мензурку наливается вода, после чего на дно сверху бросается несколько таких кристаллов.

Приготовленные для показа мензурки, в которых идет процесс диффузии, не следует трогать. Их нужно переносить в лекционную аудиторию крайне осторожно, не встряхивая содержимое. Сразу после окончания показа демонстрации мензурки нужно тщательно мыть и просушивать.

7.3. Теплота растворения.

Процессы растворения веществ, как правило, сопровождаются поглощением или выделением теплоты, которая называется теплотой растворения. Эта теплота в общем случае складывается из двух составляющих – энергии, которая затрачивается на разрушение кристаллической решетки растворяемого вещества, и энергии гидратации, которая выделяется в результате взаимодействия молекул растворителя с молекулами или ионами растворяемого вещества. В зависимости от соотношения указанных энергий, которые имеют противоположные знаки, теплота растворения может быть отрицательной (поглощаться) или положительной (выделяться).

Для демонстрации поглощения или выделения теплоты растворения показывается следующий опыт. В колбу вместимостью ~1 л наливается ~200 мл воды. В горлышко колбы вставляется резиновая пробка с пропущенной через нее металлической или стеклянной трубкой. При помощи шланга колба через эту трубку соединяется с одним из колен U-образного манометра.

Перед началом демонстрации нужно показать зрителям собранную установку и убедиться, что уровни жидкости в обоих коленях манометра одинаковы. Затем нужно вынуть пробку из колбы, бросить в нее ~50 г истолченного хлористого аммония NH_4Cl (нашатыря) иди гипосульфита $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, и вновь заткнуть колбу пробкой. Манометр покажет уменьшение давления воздуха в колбе, что будет свидетельствовать о его охлаждении вследствие поглощения теплоты при разрушении кристаллической решетки нашатыря в ходе растворения (см. рис. 7.3).

Для того чтобы продемонстрировать выделение теплоты растворения, опыт следует проводить аналогичным образом, но в колбу вместо гипосульфита или нашатыря нужно добавить немного концентрированной серной кислоты. После этого манометр зарегистрирует повышение давления в колбе, что будет свидетельствовать о нагрева-



Рис. 7.3. Поглощение теплоты при растворении хлористого аммония в воде.

нии воздуха из-за выделения теплоты при взаимодействии молекул воды и ионов, на которые при растворении диссоциирует кислота.

В завершение демонстрации можно показать еще один эффектный опыт. Для него необходим азотнокислый аммоний NH_4NO_3 (другие названия – нитрат аммония, аммиачная селитра; служит азотным удобрением). В стакан нужно налить не менее 40 см^3 воды и всыпать в нее равное по массе количество азотнокислого аммония. Затем смесь нужно быстро перемешать пробиркой, в которую налито около 1 см^3 воды. Из-за сильного поглощения теплоты вода в пробирке замерзнет, что можно продемонстрировать, спроецировав содержимое пробирки на экран при помощи видеокамеры и проекционного аппарата.

7.4. Осмотическое давление.

7.4.1. Полупроницаемая мембрана.

Осмотическое давление возникает, когда раствор и чистый растворитель разделены полупроницаемой мембраной, через которую могут проникать только молекулы растворителя. Концентрации этих молекул по обе стороны мембраны стремятся выровняться, что приводит к всасыванию растворителя в раствор и росту давления в нем. Этот эффект демонстрируется следующим образом.

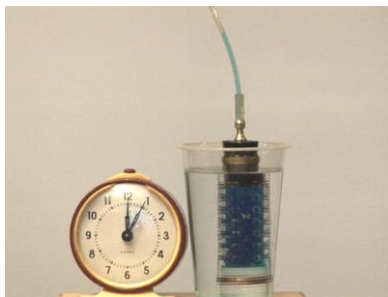


Рис. 7.4. Демонстрация осмотического давления при помощи полупроницаемой мембраны.

Подкрашенный синькой раствор сахара в воде налит доверху в закрытый пакет из целлофана, который пропускает маленькие молекулы воды, но не пропускает большие молекулы сахара. Сверху через пробку в пакет введена тонкая прозрачная гибкая трубка (соединение трубки с пакетом должно быть герметичным). Второй конец трубки открыт в атмосферу. Если погрузить этот пакет в дистиллированную

воду, то она сразу же начнет проникать в пакет через целлофан. При этом высота столбика подкрашенного раствора в трубке будет расти (см. рис. 7.4) и может достигнуть нескольких метров, что будет свидетельствовать о сильном возрастании давления в пакете. Для удобства наблюдения верхний открытый конец трубки

рекомендуется прикрепить к высокому штативу так, чтобы трубка приняла вертикальное положение.

Отметим, что благодаря наличию клеточных мембран и соответствующего осмотического давления деревья могут всасывать воду и питательные вещества из почвы и поднимать их на высоту многих десятков метров.

7.4.2. «Искусственные клетки».

Возникновение осмотического давления можно показать, продемонстрировав рост «искусственных клеток».

Для показа опыта нужно взять чашку Петри и налить в нее 2-5%-ный раствор медного купороса. Содержимое чашки нужно спроецировать на экран при помощи видеокамеры и проекционного аппарата. Затем нужно бросить на дно чашки два-три кристаллика железисто-цианистого калия (желтая кровяная соль $K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$) или железосинеродистого калия (красная кровяная соль $K_3Fe(CN)_6$). Поверхность кристалликов тут же покроется полупроницаемой оболочкой, под которую начнет проникать вода. Под действием осмотического давления эта оболочка будет расти, создавая иллюзию роста настоящих клеток (см. рис. 7.5). «Клетки» будут получаться тем лучше, чем слабее раствор медного купороса.

Демонстрация может плохо получаться из-за загрязнения поверхностей кристаллов, препятствующих образованию на них полупроницаемой оболочки. Поэтому во время приготовления опыта рекомендуется разломить кристаллы перед их бросанием в чашку, чтобы образовывать новые чистые поверхности.

Вещества, которые используются при показе данной демонстрации, ядовиты при попадании внутрь организма, и поэтому, работая с ними, следует соблюдать меры предосторожности.

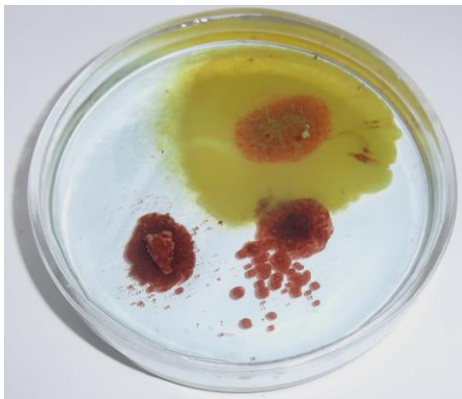


Рис. 7.5. Рост «искусственных клеток».

Глава 8

СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В завершение изучения курса молекулярной физики можно демонстрировать лекционные эксперименты, иллюстрирующие строение и свойства твердых тел [11, 12].

8.1. Модель теплового движения кристаллической решетки.

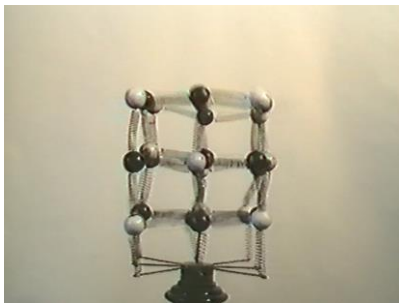


Рис. 8.1. Модель теплового движения атомов в твердом теле.

Демонстрируется модель теплового движения атомов в кристаллической решетке твердого тела. Модель состоит из разноцветных шариков, скрепленных между собой пружинками (см. рисунок 8.1). Если ее потрясти, то шарики начинают колебаться в различных направлениях вокруг своих положений равновесия. Это моделирует поведение атомов,

находящихся в узлах кристаллической решетки твердого тела, нагретого до определенной температуры.

8.2. Кристаллы.

8.2.1. Модели решеток Браве¹.

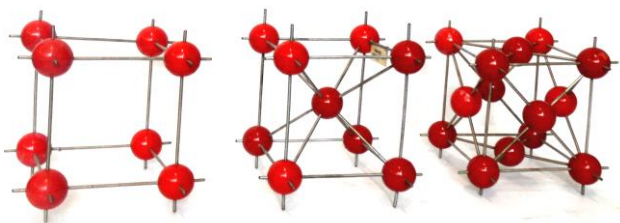
В Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова имеются модели решеток Браве, собранные из шариков, соединенных металлическими стержнями. Модели можно демонстрировать на лекциях по молекулярной физике и по физике твердого тела (см. рисунок 8.2).

Всего существует 14 типов решеток Браве, характеризующих возможные типы трансляционной симметрии кристаллической решетки. Они были установлены французским кристаллографом О. Браве в 1848 г. Решетки Браве распределяются по 7 кристаллическим системам – сингониям (от греческого σύν – «вместе», и γωνία – «угол»), которые характеризуются соотношениями между длинами ребер a , b , c элементарной ячейки кристалла и углами

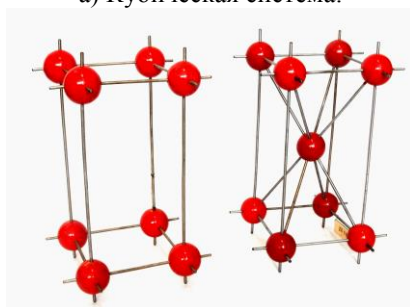
¹ О. Браве (1811 – 1863) – французский физик, один из основателей кристаллографии.

α , β , γ между ними. Это следующие системы: кубическая ($a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) – включает три решетки (рис. 8.2 а); тетрагональная ($a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) – включает две решетки (рис. 8.2 б); гексагональная ($a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$) – включает одну решетку (рис. 8.2 в); тригональная, или ромбоэдрическая ($a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$) – включает одну решетку (рис. 8.2 г); ромбическая ($a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) – включает четыре решетки (рис. 8.2 д); моноклинная ($a \neq b \neq c$, $\alpha = \gamma = 90^\circ$, $\beta \neq 90^\circ$) – включает две решетки (рис. 8.2 е); триклинная ($a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$) – включает одну решетку (рис. 8.2 ж) [18].

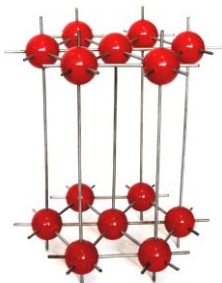
Различают *примитивные* решетки Браве, у которых атомы располагаются только в вершинах элементарных ячеек-параллелепипедов (всего их 6), *объемноцентрированные* – атомы располагаются в вершинах и в центре (их 3 – кубическая, тетрагональная и ромбическая), *гранецентрированные* – атомы располагаются в вершинах и в центрах всех граней (их 2 – кубическая и ромбическая), и *базоцентрированные* – атомы располагаются в вершинах и в центрах двух противоположных граней (их 3 – гексагональная, ромбическая и моноклинная).



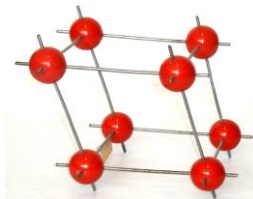
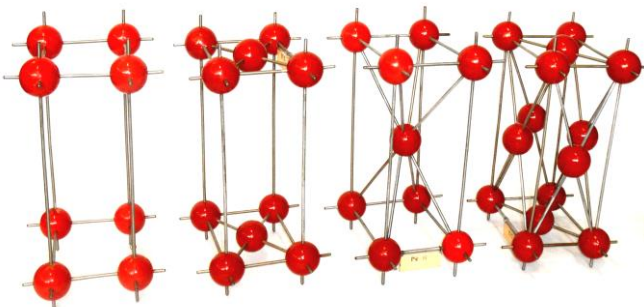
а) Кубическая система.



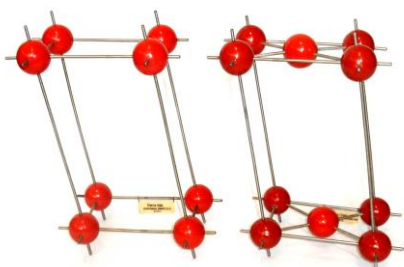
б) Тетрагональная система.



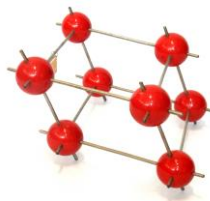
в) Гексагональная система.

г) Тригональная,
или ромбоэдрическая система.

д) Ромбическая система.



е) Моноклинная система.



ж) Триклинная система.

Рис. 8.2.

14 моделей решеток Браве для семи кристаллических систем.

8.2.2. Модели кристаллических решеток графита и алмаза.

Модели кристаллических решеток собраны из пластмассовых шаров, соединенных друг с другом при помощи металлических стержней. Стержни вставлены в просверленные в шарах отверстия и держатся там благодаря силе трения. Ориентация отверстий и длины

стержней подобраны таким образом, что взаимное расположение шаров в собранных моделях соответствует положению атомов углерода в узлах реальных кристаллических решеток графита и алмаза.

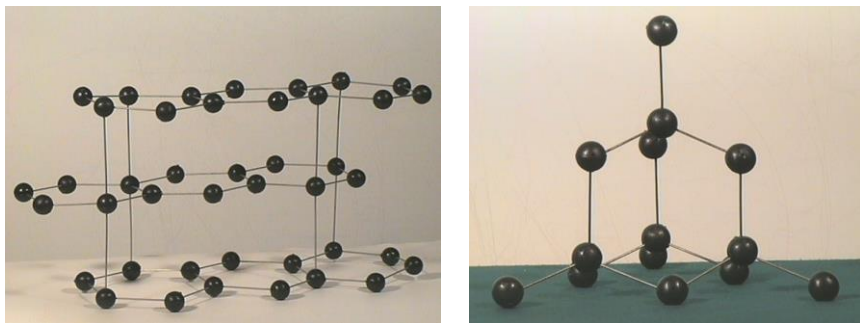


Рис. 8.3. Модели кристаллических решеток графита (слева) и алмаза (справа).

Кристаллические решетки графита и алмаза состоят из одинаковых атомов. Единственное отличие этих двух веществ с точки зрения их внутренней структуры заключается в способе соединения атомов углерода друг с другом, что приводит к сильному различию физических свойств графита и алмаза.

Элементарная ячейка кристалла графита относится к гексагональному типу (рис. 8.3, слева). Атомы углерода в графите располагаются в плоскостях в вершинах правильных шестиугольников. Образованные таким образом слои атомов соединяются между собой так, что соседние слои параллельны и сдвинуты друг относительно друга. Расстояние между соседними слоями атомов в решетке графита значительно больше, чем расстояние между атомами, лежащими в одной плоскости, и поэтому слои связаны друг с другом слабее, чем отдельные атомы в каждом слое. Этим объясняется тот факт, что графит является легко расслаивающимся, мягким, жирным на ощупь материалом. При приложении усилия в направлении вдоль атомных слоев связи между слоями легко разрываются, и графитовый образец разрушается. Графит непрозрачен, имеет серо-черный цвет и наибольшую среди всех известных веществ температуру плавления – около $4000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поэтому на базе графита изготавливаются термостойкие плитки, защищающие наиболее нагревающиеся во время посадки части космических кораблей.

Алмаз имеет кристаллическую решетку кубического типа (рис. 8.3, справа). Атомы углерода в алмазе расположены в верши-

нах куба, а также в центрах его граней и в серединах его несмежных октантов. Таким образом, получается, что каждый атом углерода лежит в середине тетраэдра, образованного четырьмя соседними атомами. Благодаря такому симметричному и плотному расположению атомов алмаз обладает исключительно высокой твердостью. Алмаз в отличие от графита прозрачен и сильно преломляет свет. Окраска кристалла алмаза определяется имеющимися в нем примесями и другими дефектами структуры. Алмаз обладает наибольшей среди всех известных веществ твердостью. Этот факт положен в основу создания шкалы твердости веществ. Твердость алмаза принята равной 10 единицам, а твердости всех остальных веществ устанавливаются по сравнению с алмазом. Одно вещество считается более твердым, чем другое, если первое оставляет царапину на поверхности второго. В частности, графит по данной шкале имеет твердость, равную 1. При нагревании до температуры $\sim 1800^\circ\text{C}$ в отсутствие кислорода алмаз превращается в графит. Возможен также и обратный переход – под действием высокого давления и высокой температуры по специальной технологии из графита получают искусственные алмазы. Эти факты доказывают, что графит и алмаз на самом деле состоят из одинаковых атомов. Имеется еще одна форма кристаллического углерода – карбин, вещество белого цвета, состоящее из параллельных прямолинейных цепочек атомов углерода.

Во второй половине XX и в начале XXI века были предсказаны и обнаружены новые аллотропные формы углерода – фуллерены, нанотрубки и графен². За открытие и изучение фуллеренов и графена были присуждены Нобелевские премии в 1996 г. (по химии) и 2010 г. (по физике).

Фуллерены³ отличаются от известных прежде кристаллических модификаций углерода тем, что это индивидуальные конечные молекулы, имеющие замкнутую форму. Первый фуллерен C_{60} (см. рис. 8.4) – глобула в виде усеченного икосаэдра, похожая на футбольный мяч и состоящая из 20 правильных шестиугольников и 12 правильных пятиугольников, был предсказан в начале 70-х годов XX века. Природные фуллерены C_{60} и C_{70} были обнаружены в мине-

² По материалам Интернета.

³ Открыты в 1985 г. химиками Р. Кёрлом (США), Х. У. Крото (Великобритания) и Р. Смолли (США); название получили по имени американского архитектора Б. Фуллера, применявшего правильные пяти- и шестиугольники для постройки куполов своих зданий.

рале шунгите, а позже и по спектрам их инфракрасного излучения в космосе, в кластерах углерода в молодых планетарных туманностях.

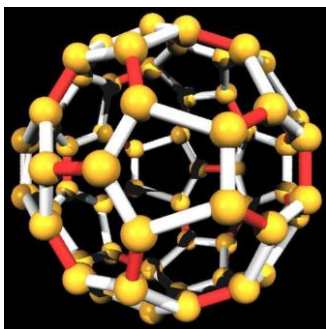


Рис. 8.4.
Модель молекулы фуллерена C_{60} .

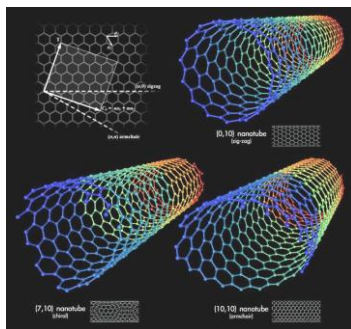


Рис. 8.5.
Различные типы нанотрубок.

Углеродные нанотрубки — это протяжённые цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров, состоящие из одной или нескольких свёрнутых в трубку графитовых плоскостей, то есть поверхностей, выложенных правильными шестиугольниками, в вершинах которых расположены атомы углерода. Трубки заканчиваются обычно полусферической головкой, которая может рассматриваться как половина молекулы фуллерена. Результат сворачивания в трубку зависит от угла ориентации графитовой плоскости относительно оси нанотрубки (см. рис. 8.5). Угол ориентации определяет, в частности, электрические характеристики нанотрубок. Нанотрубки бывают разной формы: однослойные и многослойные, прямые и спиральные, с открытыми и закрытыми концами. Нанотрубки являются на редкость прочным материалом, как на растяжение, так и на изгиб. Более того, под действием механических напряжений, превышающих критические, нанотрубки не «рвутся», а перестраиваются. Модуль Юнга у однослойной нано-трубки достигает величин $\sim 1\text{--}5$ ТПа, что на порядок больше, чем у стали.

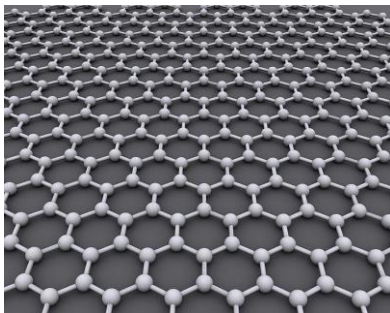


Рис. 8.6. Структура графена.

Графен (англ. graphene) – слой атомов углерода, соединённых в гексагональную двумерную кристаллическую решётку (см. рис. 8.6). Данную аллотропную форму углерода, описанную теоретически более 60 лет назад и широко используемую для описания свойств различных материалов на основе углерода, очень долго не удавалось получить практически, по-

скольку считалось, что двумерные кристаллы не могут существовать из-за своей нестабильности. Это мнение было опровергнуто лишь в 2004 году, когда совместными усилиями ученых Манчестерского университета (Великобритания) под руководством профессора Андрея Гейма и российского Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых металлов в Черноголовке под руководством доктора К. С. Новоселова удалось получить и воспроизвести структуру графена. За «передовые опыты с двумерным материалом графеном» А. К. Гейму и К. С. Новосёлову была присуждена Нобелевская премия по физике за 2010 год.

В Интернете имеется большое количество статей и рисунков с изображениями структур фуллеренов, нанотрубок и графена, а также их свойств и возможных применений, поэтому на лекциях целесообразно использовать эти материалы для иллюстрации современного состояния науки об углероде и его модификациях.

8.3. Полиморфизм. Опыт Брэгга⁴.

Изменение объема твердого тела при полиморфном превращении и выделение теплоты, происходящее при этом фазовом переходе, можно продемонстрировать на примере перехода кристаллической решетки железа из α - в γ -модификацию и обратно. Для показа опыта нужно натянуть горизонтально железную проволоку диаметром ~ 1 мм и длиной ~ 7 -10 м (см. рис. 8.7). При этом один конец S проволоки закрепляется неподвижно, а ко второму концу для обеспечения натяжения прикрепляется груз P массой ~ 1 кг, и этот конец

⁴ У. Л. Брэгг (1890 – 1971) – английский физик, лауреат Нобелевской премии (1915 г.), член Лондонского королевского общества.

перебрасывается через неподвижный блок B . К оси блока нужно прикрепить стрелку S , по повороту которой можно будет судить об удлинении либо укорочении проволоки. Последовательно с проволокой включается реостат R , который позволяет регулировать силу электрического тока, пропускаемого через нее при показе демонстрации (проволока включается в цепь при помощи накладных клемм). Сила тока контролируется по показаниям амперметра A . Свет в аудитории во время демонстрации должен быть притушен.

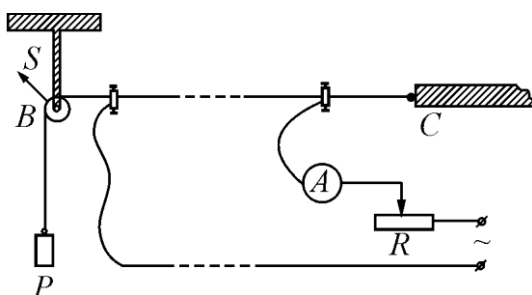


Рис. 8.7. Схема опыта Брегга.

Подключив цепь, состоящую из проволоки и реостата, к сети переменного тока, постепенно увеличивают силу тока до ~ 10 А – до тех пор, пока проволока не достигнет красного каления. При этом проволока нагревается, начинает довольно ярко светиться, и удлиняется на ~ 15 – 20 см, что можно зафиксировать по повороту стрелки, прикрепленной к блоку (если проволока натянута так, как показано на рис. 8.7, то поворот происходит против часовой стрелки). При нагревании до температуры $+917^\circ\text{C}$ происходит превращение α -железа с объёмноцентрированной кубической решёткой в γ -железо с гранецентрированной кубической решёткой. Однако заметить этот переход трудно. Гораздо легче наблюдать обратный переход. Для этого нужно дожидаться, пока удлинение проволоки прекратится, и выключить электрический ток. После этого проволока начнет остывать, яркость ее свечения будет уменьшаться, и проволока будет укорачиваться, о чем можно судить по повороту стрелки в обратном направлении (по часовой стрелке, см. рис. 8.7). В момент превращения γ -железа обратно в α -железо происходит увеличение объема проволоки, и она испытывает быстрое удлинение – стрелка делает резкое движение против часовой стрелки, а потом снова начинает медленно вращаться по часовой стрелке. В этот же момент выделяется теплота фазового пере-

хода, которая идет на кратковременное нагревание проволоки, из-за чего яркость ее свечения на мгновение заметно увеличивается.

Проволоку, использованную для показа демонстрации несколько раз, рекомендуется заменять, так как при многократном повторении опыта с одним и тем же отрезком проволоки вспышка в момент фазового перехода становится видна все хуже и хуже.

Следует отметить, что полиморфные переходы могут быть не только обратимыми (энантиотропными), как описанный выше фазовый переход железа из α - в γ -модификацию и обратно, но и необратимыми (монотропными). Ярким примером монотропного перехода служит превращение белого олова в серое олово. При комнатной температуре белое олово (β -модификация Sn) является пластичным металлом, имеющим тетрагональную кристаллическую решетку. При понижении температуры до $\sim 13^\circ\text{C}$ олово начинает медленно переходить в α -модификацию с кубической решеткой. В этой модификации олово существует в виде порошка. Фазовый переход происходит с малой скоростью (то есть после понижения температуры ниже точки фазового перехода β -модификация является метастабильной, то есть достаточно устойчивой). Однако полиморфный переход резко ускоряется при понижении температуры до -33°C , и при контакте метастабильного β -олова с α -оловом. Поскольку при данном фазовом превращении происходит резкое увеличение удельного объема, то оловянные предметы рассыпаются в порошок, причем попадание этого порошка на «не пораженные» предметы приводит к их быстрой порче (предметы как бы «заражаются»). Вернуть олово в β -модификацию возможно только путем его переплавки.

Описанное явление получило название «оловянная чума». Оно явилось основной причиной гибели экспедиции Р.Ф. Скотта⁵ к Южному полюсу в 1912 г. (экспедиция осталась без топлива – оно вытекло из баков, запаянных оловом, которое поразила «оловянная чума»). Также существует легенда, согласно которой одной из причин неудачи армии Наполеона в России явились сильные зимние морозы, которые превратили в порошок оловянные пуговицы на мундирах солдат. «Оловянная чума» погубила многие ценнейшие коллекции оловянных солдатиков. Например, в запасниках петербургского музея Александра Суворова превратились в труху десятки фигурок – в подвале, где они хранились, лопнули зимой батареи отопления.

⁵ Р. Ф. Скотт (1868 – 1912) – британский полярный исследователь.

8.4. Тепловое расширение.

8.4.1. Шар и отверстие.

Явление теплового расширения металла можно продемонстрировать следующим образом. На штативе подвешивается металлический шар, диаметр которого чуть-чуть меньше, чем у отверстия, сделанного в металлической подставке. Когда и шар, и подставка с отверстием имеют комнатную температуру, шар свободно проходит через отверстие. Если нагреть шар в пламени газовой горелки, то он больше не будет пролезать в отверстие, что свидетельствует о тепло-вом расширении металла при нагревании (см. рис. 8.8). Если затем охладить шар в стакане с водой, то металл сожмется, и шар снова будет легко проходить через отверстие в подставке.



Рис. 8.8. Нагретый шар и подставка с отверстием.

В завершение показа этого опыта нужно нагреть в пламени металлическую подставку с отверстием и продемонстрировать, что шар, вопреки распространенному заблуждению, по-прежнему свободно проходит через отверстие.

8.4.2. Тепловое расширение стержней из разных металлов.

Различные металлы расширяются по-разному. Это можно продемонстрировать при помощи специальной установки.

Установка (рис. 8.9) состоит из металлического основания и прикрепленных к нему шкалы и двух держателей, на которых в горизонтальном положении установлены три стержня одинаковых размеров, выполненные из разных металлов (алюминиевый, затем латунный и стальной). Каждый стержень одним концом упирается в юстировочный винт,

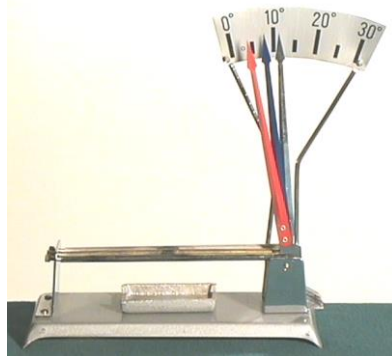


Рис. 8.9. Установка для демонстрации теплового расширения различных металлов.

при помощи которого можно аккуратно регулировать положение стержня, а другим концом – в стрелку. Все три разноцветные стрелки могут вращаться вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной стержням. Нижние концы стрелок находятся ниже этой оси и оттягиваются пружинами, которые обеспечивают упор стрелок в стержни. Шкала, вдоль которой движутся острия стрелок, проградуирована от 0° до 30° с шагом 5° . К установке прилагается маленький металлический поддон, служащий для сжигания горючего вещества – сухого спирта.

При показе демонстрации нужно поджечь сухое горючее, дожидаться, пока оно хорошо разгорится, и затем начать периодически двигать поддон при помощи пинцета вдоль стержней, добиваясь их равномерного нагрева по всей длине. По мере нагревания стержней они будут удлиняться и давить на стрелки, по величине отклонения которых можно будет судить о тепловом расширении стержней. Сильнее всех будет расширяться алюминиевый стержень, чуть слабее – латунный, и еще слабее – стальной. Когда стрелка, движимая алюминиевым стержнем, отклонится примерно на 10° , нужно погасить сухое горючее и наблюдать остывание стержней, сопровождающееся их сокращением. Стрелки при этом будут постепенно возвращаться в исходное положение.

При объяснении наблюдаемого явления теплового расширения полезно сообщить зрителям значения средних температурных коэффициентов линейного расширения $\bar{\alpha} = \frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta T}$ для используемых

в опыте металлов (этот коэффициент позволяет рассчитать, на какую величину Δl удлинится образец длиной l при его нагревании на ΔT градусов). В данной установке используются стержни одинаковой длиной $l = 180$ мм, изготовленные из алюминия ($\bar{\alpha}_{\text{ал}} \cong 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), латуни ($\bar{\alpha}_{\text{лат}} \cong (17 \div 20) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и стали ($\bar{\alpha}_{\text{ст}} \cong (11 \div 12) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Температурный коэффициент линейного расширения зависит от интервала температур, в котором происходит нагревание образца, от его внутренней структуры и наличия в образце примесей и добавок. Приведенный коэффициент $\bar{\alpha}_{\text{ал}}$ относится к чистому алюминию в кристаллическом состоянии вблизи комнатной температуры; коэффициент $\bar{\alpha}_{\text{лат}}$ дан в интервале температур $(20 \div 100)^\circ\text{C}$ для латуни с различным процентным содержанием меди в сплаве; наконец, коэффициент $\bar{\alpha}_{\text{ст}}$ указан для углеродистых сталей различных марок

вблизи 100 °С. В описанной установке температурные коэффициенты линейного расширения стержней лежат в указанных пределах, и в любом случае $\bar{\alpha}_{\text{ал}} > \bar{\alpha}_{\text{лат}} > \bar{\alpha}_{\text{ст}}$. Поскольку во время показа демонстрации стержни нагреваются примерно до одинаковой температуры, то их удлинения пропорциональны соответствующим величинам $\bar{\alpha}$. Поэтому сильнее всего отклоняется стрелка, в которую упирается алюминиевый стержень, стрелка у стального стержня отклоняется примерно на вдвое меньшую величину, а отклонение стрелки у латунного стержня является промежуточным.

В КФД физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова имеется и несколько иной вариант этой же демонстрационной установки. Она устроена в целом аналогично описанной выше, с той лишь разницей, что на держателях установлен всего один стержень, нагревание которого осуществляется при помощи смонтированной под ним системы маленьких газовых горелок. Эта установка позволяет наблюдать явление теплового расширения металлов, но не дает возможности сравнивать средние температурные коэффициенты линейного расширения разных металлов.

8.4.3. Расширение металла и сжатие резины при нагревании.

При нагревании тела могут не только расширяться, но и сжиматься. Ярким примером вещества, которое при нагревании уменьшает свои размеры, является резина.

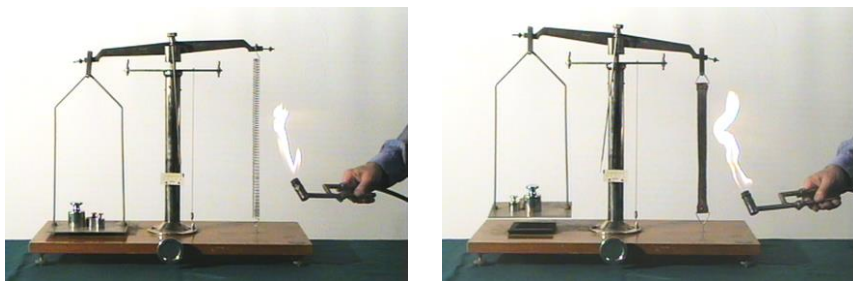


Рис. 8.10. Удлинение пружины и сокращение резиновой ленты при нагревании.

Установка для демонстрации зависимости размеров металлических и резиновых тел от температуры представляет собой рычажные весы, вместо одной из чашек которых к коромыслу прикрепляется в вертикальном положении либо стальная пружина, либо резиновая лента (см. рис. 8.10). Нижний конец пружины или

ленты крепится к основанию весов, после чего весы уравниваются грузами. Далее пружина или лента слегка подогреваются по всей длине пламенем газовой горелки, и стрелка весов отклоняется, демонстрируя противоположное изменение длины стальной пружины и резиновой ленты при нагревании: пружина удлиняется (рис. 8.10, слева), а резиновая лента сокращается (рис. 8.10, справа). После остывания стрелка весов возвращается к исходному положению, что говорит об отсутствии остаточных деформаций.

При показе демонстрации ни в коем случае нельзя перегревать пружину и резиновую ленту (в частности, нельзя сильно нагревать их в каком-либо одном месте). При перегревании свойства металла и резины изменяются, и тепловые деформации становятся необратимыми.

8.5. Увеличение твердости при охлаждении.

8.5.1. Резиновый и свинцовый колокольчики.



Рис. 8.11. Резиновый и свинцовый колокольчики.

Твердость различных материалов возрастает при их охлаждении. Для того, чтобы продемонстрировать это, необходимы два колокольчика: один изготовлен из резины, а другой – из мягкого металла – свинца. (Резиновый колокольчик можно сделать из срезанной резиновой спринцовки, к которой прикрепляется ручка; роль язычка колокольчика выполняет подвешенная внутри на проволоке небольшая гайка.) При комнатной температуре оба колокольчика не звенят, а лишь издают глухой стук. Если погрузить оба колокольчика в сосуд Дьюара с широким горлышком, наполненный жидким азотом (рис. 8.11), то после охлаждения до температуры -196°C оба колокольчика будут звенеть громко и звонко, что свидетельствует об увеличившейся твердости материалов, из которых они сделаны.

После окончания демонстрации нужно поставить колокольчики на стол, дождаться, пока они самостоятельно нагреются до комнатной температуры и продемонстрировать, что колокольчики снова не звенят, то есть твердость материалов при нагревании вернулась к прежнему значению.

Резиновый колокольчик после охлаждения нельзя ронять и сильно ударять, так как он может расколоться.

8.5.2. Хрупкость резины.

При охлаждении материалов возрастает не только их твердость, но и хрупкость (хрупкость материала, кроме всего прочего, проявляется в том, что он, будучи достаточно твердым, не выдерживает ударных нагрузок). Это можно продемонстрировать на примере резины, которая после охлаждения в жидком азоте до температуры $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ становится твердой и хрупкой, как стекло.

Перед показом опыта нужно положить резиновую трубку, имеющую комнатную температуру, на наковальню и несколько раз ударить по трубке молотком, демонстрируя, что резина упругая и молоток не причиняет ей никакого вреда. Затем нужно окунуть конец этой резиновой трубки длиной $\sim 5\text{--}7\text{ см}$ в жидкий азот и дождаться, пока резина охладится до азотной температуры (это можно определить по прекращению бурного кипения, возникающего при погружении теплого предмета в жидкий азот). Вынув из азота охладившийся конец резиновой трубки, нужно снова положить его на наковальню и начать ударять по кончику трубки молотком (см. рис. 8.12). Трубка будет крошиться и разлетаться на мелкие кусочки, демонстрируя хрупкость (то, что резина при этом имеет достаточно большую твердость, доказывает описанный выше опыт с резиновым колокольчиком, который начинает звенеть после охлаждения почти так же, как металлический при обычных условиях). При ударах же по теплой части трубки такого разрушения происходить по-прежнему не будет.



Рис. 8.12. Демонстрация хрупкости резины.

Показывая опыт, нужно иметь в виду, что при погружении в жидкий азот одного конца резиновой трубки из ее другого конца, находящегося в воздухе, может начать фонтанировать жидкий азот, попадание которого на руки и на одежду демонстратора нежелательно.

8.6. Сравнение температуропроводности различных металлов и сплавов.

В опыте демонстрируется процесс распространения теплоты в стержнях, изготовленных из различных металлов и сплавов.

При стационарном (установившемся) распространении теплоты в стержне поток тепловой энергии определяется установившимся распределением температуры и зависит от коэффициента теплопроводности вещества стержня λ (величину λ часто называют просто «теплопроводностью»). Этот коэффициент является характеристикой вещества, зависит от его внутреннего строения и от внешних условий. При нестационарном распространении теплоты, когда распределение температуры в стержне еще не установилось, возникает задача определения скорости изменения температуры вдоль стержня. Оказывается, что ход процесса нестационарной теплопроводности определяется отношением $a = \lambda / (\rho c)$, зависящим не только от величины коэффициента теплопроводности, но и от плотности ρ и удельной теплоемкости c вещества. Коэффициент a называется коэффициентом температуропроводности вещества, или просто «температуропроводностью». Он получил свое название из-за того, что в веществах, имеющих большее значение коэффициента a , температура «распространяется» от источника теплоты с большей скоростью.

Центральная часть прибора (см. рис. 8.13), который используется для показа демонстрации, представляет собой металлический диск с просверленным в центре отверстием. В боковой поверхности диска имеются цилиндрические углубления с резьбой, в

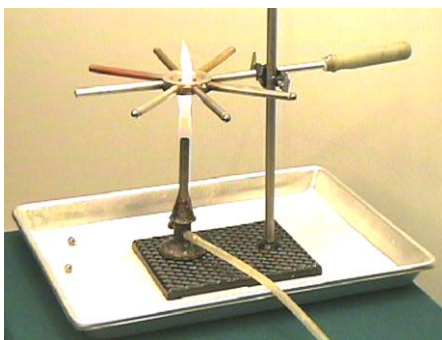


Рис. 8.13. Демонстрация температуропроводности различных металлов и сплавов.

которые ввинчиваются семь стержней одинаковых размеров, сделанных из разных металлов и сплавов: меди, бронзы, латуни, алюминия, дюралюминия, малоуглеродистой стали и нержавеющей стали. К диску привинчена ручка, при помощи которой прибор можно крепить в зажиме на штативе, а к концам стержней, снабженным коническими углублениями, на маленьких кусоч-

ках пластилина или парафина прилепляются одинаковые стальные шарики. Диск нагревается пламенем газовой горелки, проходящим через центральное отверстие. О различной скорости изменения температуры на концах различных стержней судят по последовательности падения шариков, отклеивающихся при размягчении нагревающегося пластилина (парафина). Шарики падают в металлический поддон, который позволяет более четко услышать звук от их падения.

При показе демонстрации нужно зажечь газовую горелку и отрегулировать ее положение и высоту пламени так, чтобы пламя располагалось симметрично относительно центрального отверстия прибора и равномерно прогревало диск. Через некоторое время после начала нагревания можно будет наблюдать последовательное падение шариков в поддон, сопровождающееся резким стуком. Сначала шарик отклеится от медного стержня; затем, через небольшие промежутки времени – от алюминиевого, дюралюминиевого, бронзового и латунного стержней; еще через некоторое, достаточно большое, время – от стержня, сделанного из малоуглеродистой стали. Наконец, от стержня, выточенного из нержавеющей стали, шарик сможет отклеиться только через очень большое время после начала нагревания (или вообще не отклеится, если длительность проведения опыта на лекции ограничена).

Поскольку во время показа опыта мы судим о нагревании конца каждого из стержней до определенной температуры по отклеиванию от него шарика, то в данном эксперименте главную роль играет именно температуропроводность стержня – шарик раньше всего будет отклеиваться от того стержня, конец которого быстрее нагреется до температуры размягчения пластилина. Поэтому в первую очередь отваливается шарик, прилепленный к медному стержню – медь имеет большой коэффициент теплопроводности ($\sim 400 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), небольшую удельную теплоемкость ($\sim 0,4 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$) и довольно высокую плотность ($\sim 8,9 \text{ г/см}^3$), что обеспечивает ей большую температуропроводность. Затем отваливается шарик, прилепленный к алюминиевому стержню. Теплопроводность алюминия примерно вдвое меньше, чем у меди, а удельная теплоемкость – примерно вдвое больше, но зато алюминий более чем в три раза легче меди (плотность алюминия $\sim 2,7 \text{ г/см}^3$). Поэтому температуропроводность у алюминия лишь ненамного меньше, чем у меди. Дюралюминий имеет плотность и удельную теплоемкость почти такие же, как и алюминий, а его теплопровод-

ность несколько меньше, чем у алюминия. Поэтому дюралюминиевый стержень прогревается несколько медленнее алюминиевого. Далее в процессе нагревания последовательно отваливаются шарики, прилепленные к бронзовому и к латунному стержням. Бронза и латунь – это сплавы меди, имеющие примерно одинаковые плотности ($\sim 8,5 \div 8,8 \text{ г/см}^3$) и удельные теплоемкости ($\sim 0,4 \div 0,5 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$), однако теплопроводность бронзы приблизительно равна теплопроводности алюминия, а теплопроводность латуни примерно вдвое меньше, в связи с чем латунный стержень прогревается медленнее бронзового. Позже всего отклеиваются шарики, прилепленные к стальным стержням. Различные марки сталей имеют приблизительно одинаковые удельные теплоемкости ($\sim 0,5 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$) и плотности ($\sim 8 \text{ г/см}^3$), но теплопроводность разных сталей в зависимости от их состава может изменяться в широких пределах. Так, нержавеющая сталь имеет теплопроводность примерно в 5 раз меньшую теплопроводности малоуглеродистой стали (или железа). Поэтому малоуглеродистая сталь прогревается медленнее латуни, но значительно быстрее, чем нержавеющая сталь. В последней процесс прогрева происходит настолько медленно, что для отклеивания шарика может не хватить лекционного времени.

При показе опыта нужно следить, чтобы стержни были горизонтальны, а пламя горелки находилось строго под центральной частью прибора. Языки пламени не должны нагревать сами стержни, а только диск с отверстием, поэтому эксперимент нужно показывать в отсутствие сквозняков. Не следует прикасаться к стержням во время показа опыта – они могут быть очень горячими. После окончания демонстрации нужно дождаться полного остывания стержней на воздухе. Не рекомендуется остужать прибор в воде, так как она затекает под резьбу ввинченных стержней и потом остается там в течение длительного времени, вызывая окисление.

8.7. Динамика распространения теплоты в стержне.

Данный лекционный эксперимент, аналогичный описанному в книге [19], иллюстрирует решение уравнения нестационарной теплопроводности, то есть уравнения диффузии температуры. Установка демонстрирует динамику процесса распространения теплоты в стержне, который можно нагревать горелкой с остронаправленным пламенем.

Установка устроена следующим образом. В качестве теплопроводящего стержня используется медная пластина размерами $\sim 250 \times 25 \times 1$ мм, к которой твердым припоем припаяна тонкостенная ($\sim 0,5$ мм) медная трубка прямоугольного сечения (6×10 мм) длиной около 300 мм. Трубка обеспечивает пластине жесткость; кроме того, при необходимости по ней можно пропустить поток воздуха или воды для быстрого охлаждения. Концы трубки закреплены в теплоизолирующем корпусе прибора, изготовленном из асбоцементной плиты. К пластине через каждые 10 мм привинчены биметаллические пластинки размером $35 \times 8 \times 0,5$ мм (всего их 24). Биметаллические пластинки прикреплены таким образом, что при нагревании они отклоняются от медной пластины. На концы пластинок приклеены при помощи герметика маленькие зеркала наружного напыления (Al) на стеклянных подложках размером $\sim 8 \times 8 \times 1$ мм. Корпус прибора с задней стороны имеет продольный вырез шириной 20 мм, через который можно нагревать пластину горелкой в любом месте. Спереди корпус закрыт толстым стеклом, предохраняющим биметаллические пластинки с зеркалами от пыли и механических повреждений. Установка прибора в рабочее положение осуществляется при помощи регулировочных винтов на штативе.

Для получения на экране картины распределения температуры используется узкий пучок света от гелий-неонового лазера, сканирующий в горизонтальной плоскости. Сканирование осуществляется на сетевой частоте (50 Гц) при помощи специально приспособленной головки от прибора магнитоэлектрической системы. Часть магнитопровода у головки удалена, а к рамке эпоксидным клеем приклеено небольшое зеркало, от которого отражается лазерный луч. Питание рамки осуществляется от сети (~ 220 В) через два последовательно включенных конденсатора, снижающих напряжение на рамке до необходимой величины. Угол отклонения луча при этом достигает $20\text{--}30^\circ$ (амплитуду развертки можно регулировать при помощи специального переключателя). Лазерный луч, развернутый головкой в горизонтальной плоскости, освещает прибор. Лучи, отраженные от защитного стекла, дают на экране сплошную «нулевую» линию. Предварительная юстировка прибора заключается в том, чтобы при помощи небольшого подгибания биметаллических пластинок в отсутствие нагрева установить все лучи, отраженные от зеркал на пластинках, в соответствующем по-

рядке на эту нулевую линию. Как показывает опыт эксплуатации прибора, такая юстировка достаточно стабильна и не требует коррекции перед началом каждой демонстрации.

При подготовке демонстрации нужно установить прибор на аудиторном столе, повернув его зеркалами к экрану. Между прибором и экраном поставить устройство для развёртки лазерного луча так, чтобы его зеркало было направлено к прибору и находилось немного ниже зеркал прибора. Рядом с прибором поставить лазер, закрепленный на штативе так, чтобы после его включения луч, отразившись от развёртывающего зеркала, попадал на средние зеркала прибора и, отразившись от них, на экран. Включить развёртывающее устройство в сеть ~220 В и при помощи переключателя амплитуды развёртки добиться, чтобы все зеркала были освещены лазерным лучом. На экране при этом должна наблюдаться «нулевая» линия (отражение от защитного стекла прибора), и на её фоне – 24 отражения от зеркал на биметаллических пластинках прибора.



Рис. 8.14. Распределение температуры в стержне.

Для показа демонстрации нужно затемнить аудиторию и локально нагреть горелкой с остронаправленным пламенем среднюю часть медной пластины в вырезе с задней стороны прибора, получив узкое «гауссовское» распределение температуры вдоль стержня, близкое к δ -функции (рис. 8.14). Прекратив нагревание, можно наблюдать «расползание» этой

гауссовской функции с течением времени по стержню: острый пик на графике постепенно становится ниже и шире, в центре температура падает, а на краях увеличивается. Постепенно температуры вдоль всего стержня выравниваются, а затем медленно уменьшаются по мере его остывания.

Результат опыта можно объяснить при помощи уравнения нестационарной теплопроводности. В данном случае в отсутствие источников теплоты и потерь на теплоотдачу в окружающую среду

это уравнение имеет вид: $\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$, где $T(x, t)$ – значение температуры в точке стержня с координатой x в момент времени t ,

$a = \lambda/(\rho c)$ – коэффициент температуропроводности (см. описание демонстрации 8.6). Общим решением этого уравнения с начальным

условием $T(x, 0) = \varphi(x)$ является функция $T(x, t) = \int\limits_{-\infty}^{+\infty} G(x, \xi, t) \varphi(\xi) d\xi$,

где $G(x, \xi, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi at}} e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4at}}$. В частности, для начального условия,

заданного в виде δ -функции $\varphi(x) = \delta(x - x_0)$, получается решение

$T(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi a}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4at}}$, то есть распределение температуры вдоль

стержня является гауссовской функцией, «расползающейся» с течением времени. Начальное распределение температуры, близкое к δ -функции, физически можно реализовать, сильно нагревая длинный стержень вблизи одной точки (с некоторой координатой x_0), как это и делается при показе данного опыта.

В завершение демонстрации нужно охладить стержень до комнатной температуры путём пропускания потока воздуха через трубку, припаянную к стержню, и повторить опыт при различных более сложных начальных условиях – нагревая два конца стержня при холодной середине; нагревая горелкой и охлаждая при помощи ватки, смоченной жидким азотом, две разные точки стержня, и т.д.

8.8. Сравнение теплоемкости различных металлов и сплавов.

Демонстрационный прибор для сравнения теплоемкости различных металлов и сплавов представляет собой закрепленную на подставке металлическую раму со съемной верхней частью, в которой проделаны четыре пары одинаковых отверстий. В эти отверстия, как в направляющие, вставлены цилиндрические стержни, к которым снизу прикреплены цилиндры одинакового размера, сделанные из железа, латуни, алюминия и свинца. В нижней части рамы установлена пластина из парафина. Эту пластину необходимо предварительно отлить в специальной форме, расплавив парафин на водяной бане.

Верхнюю часть рамы с цилиндрами снимают и нагревают их на водяной бане до температуры 100 °С. Затем верхнюю часть рамы с нагретыми цилиндрами ставят обратно так, чтобы они опирались сверху на пластину. Цилиндры начинают расплавлять парафин, опускаясь под действием силы тяжести. Поскольку плавление



Рис. 8.15.

Сравнение теплоемкости различных металлов и сплавов.

происходит за счет теплоты, отнимаемой от цилиндров, то чем больше их теплоемкость, тем глубже они погружаются в парафин (см. рис. 8.15). Оказывается, что эта глубина погружения максимальна у железного цилиндра, чуть меньше – у латунного, еще меньше – у алюминиевого, и минимальна – у свинцового.

Для того чтобы понять, какая теплоемкость играет роль в данном эксперименте, во время

его проведения следует показать слушателям таблицу, в которой приведены значения молярных, удельных и объемных теплоемкостей металлов и сплавов, из которых изготовлены цилиндры. Полученное в опыте соотношение глубин проплавления парафиновой пластины примерно соответствует соотношению объемных теплоемкостей цилиндров, поскольку их объемы одинаковы.

8.9. Межмолекулярные силы. Плитки Иогансона⁶.

Металлические поверхности, обработанные до высокой степени чистоты, при тесном контакте притягиваются друг к другу за счет межмолекулярных сил, действующих на очень малых расстояниях. Это демонстрируется на примере плиток Иогансона, которые представляют собой калиброванные по толщине стальные бруски, противоположные поверхности которых обработаны с высокой точностью, чистотой поверхности и степенью параллельности друг другу. Одну плитку зажимают в штативе так, чтобы ее обработанная поверхность оказалась горизонтальной и находилась внизу, а другую плитку прижимают к ней снизу также обработанной поверхностью, и она притягивается и висит, не падая (рис. 8.16). Однако этот эффект наблюдается только при чистых поверхностях плиток: стоит провести по ним пальцем, загрязнив их жиром, как притяжение исчезает, нижняя плитка перестает держаться на верхней после прижатия и падает, как только ее отпускают. Поэтому перед показом демонстрации плитки надо тщательно обезжирить

⁶ Называются так по наименованию шведской фирмы «Иогансон», которая в 1900 году продемонстрировала их на Всемирной выставке в Париже.

спиртом или ацетоном, а затем протереть их сухой чистой тряпочкой, не оставляющей волокон на их поверхностях.

Плитки Иогансона с целью предохранения от внешних воздействий хранятся в специальных футлярах (рис. 8.17). Все манипуляции с ними желательно проводить, натянув на руки сухие нитяные перчатки.

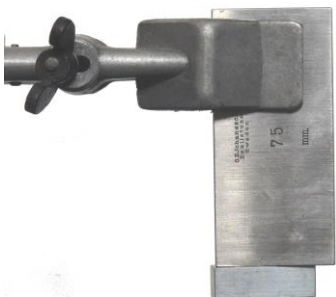


Рис. 8.16.
Протяжение плиток Иогансона.



Рис. 8.17.
Плитки Иогансона в футляре.

Литература

1. Млодзеевский А. Б. Лекционные демонстрации по физике. Вып. 1. Молекулярная физика и термодинамика. – М.–Л.: ОГИЗ Гос. изд-во технико-теоретической литературы «Гостехиздат», 1948. – 172 с.
2. Грабовский М. А. Лекционные демонстрации по физике. Вып. 2. Механика жидкостей и газов. / Под ред. Млодзеевского А. Б. – М.–Л.: ОГИЗ Гос. изд-во технико-теоретической литературы «Гостехиздат», 1948. – 160 с.
3. Грабовский М. А., Млодзеевский А. Б., Усагин С. И. Каталог лекционных демонстраций по общему курсу физики (на правах рукописи). – М.: Изд-во МГУ, 1959. – 144 с.
4. Грабовский М. А., Млодзеевский А. Б., Телеснин Р. В. и др. Лекционные демонстрации по физике. / Под ред. Ивероновой В. И. – М.: Наука, 1972. – 640 с.
5. Вабищевич М. Г., Корчажкин В. В., Мусаев Т. Ш., Окс С. Н., Семенов М. В. Учебный прибор. // А.с. АС №1460736, выдано Госкомизобретений СССР 22.10.1988.
6. Вабищевич М. Г., Корчажкин В. В., Мусаев Т. Ш., Семенов М. В. Прибор для демонстрации зависимости коэффициента внутреннего трения газа от температуры. // А.с. АС №1444866, выдано Госкомизобретений СССР 15.08.1988.
7. Вабищевич М. Г., Корчажкин В. В., Матвеев А. Н., Мусаев Т. Ш., Семенов М. В. Устройство для демонстрации распространения тепла в стержне. // А.с. АС №1430980, выдано Госкомизобретений СССР 15.06.1988.
8. Вабищевич М. Г., Кротов С. С., Мусаев Т. Ш., Мележко А. Н., Семенов М. В. Устройство для моделирования анализа дислокаций в твердом теле. // А.с. АС №1675928, выдано Госкомизобретений СССР 08.05.1991.
9. Семёнов М. В., Якута А. А. Измерение отношения $\gamma = C_p/C_v$ у газов методом Рухардта: Учеб. пособие. – М.: Физический факультет МГУ, 1996. – 16 с.
10. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. – М.: Высшая школа. 1987. – 400 с.
11. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1990. – 552 с.
12. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. – М.: Наука. 1976. – 500 с.
13. Рейф Ф. Статистическая физика. БКФ, Т.5. – М.: Наука. 1986. – 352 с.
14. Киттель Ч. Статистическая термодинамика. – М.: Наука. 1977. – 336 с.
15. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 4. Кинетика, теплота, звук. – М., Мир, 1977. – 261 с.

-
16. Семенов М. В., Якута А. А. Видеозаписи лекционных экспериментов. // Съезд российских физиков-преподавателей «Физическое образование в XXI веке»: Тез. докл. – М., 2000. – С. 244.
 17. Семенов М. В., Якута А. А. Механика. Лекционный эксперимент. Под ред. А. М. Салецкого / Учебное пособие. М.: Физический факультет МГУ, 2012. – 352 с.
 18. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А. М. Прохоров. Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. – М.: Сов. Энциклопедия, 1983. – 928 с., ил.
 19. Meiners H. F. (ed). Physics Demonstration Experiments. – N.-Y., Ronald, 1970, v. 2, p. 765 - 766.

Список видеодемонстраций по курсу «Молекулярная физика»

1. Молекулярно-кинетическая теория. Идеальный газ.

- 1.1. Биномиальное распределение.
 - $N = 2$
 - $N = 3$
 - $N = 4$
- 1.2. Нормальное распределение. Доска Гальтона.
- 1.3. Модель идеального газа. Опыт Эйхенвальда.
- 1.4. Распределение молекул в поле силы тяжести.
- 1.5. Изменение давления газа с высотой.
- 1.6. Измерение температуры.
 - Модель газового термометра.
 - Ртутные термометры.
- 1.7. Измерение давления.
 - U-образный манометр.
 - Манометр Бурдона.

2. Явления переноса в газах.

- 2.1. Вязкость газа.
- 2.2. Зависимость вязкости газа от температуры.
- 2.3. Независимость вязкости газа от давления.
- 2.4. Сравнение теплопроводностей воздуха и метана.
- 2.5. Независимость теплопроводности газа от давления.
- 2.6. Модель диффузии.
- 2.7. Диффузия паров брома.
- 2.8. Эффузия газа через пористую перегородку.
 - Изотермическая эффузия.
 - Термозэффузия. Эффект Кнудсена.

3. Теплота и работа. Тепловые двигатели.

- 3.1. Превращение работы в теплоту.
 - Опыт Тиндаля.
 - Свинец на наковальне.
 - Воздушное огниво.
- 3.2. Превращение теплоты в работу.
- 3.3. Вихревая трубка Ранке и Хильша.
- 3.4. Модели тепловых двигателей.

- Двигатель Стирлинга
- Паровая машина
- Колесо с резиновыми спицами.
- «Термомобиль».
- Пьющая утка.
- Опыт Дарлинга.
- Ячейки Бенара.

3.5. Элементы синергетики.

- Ячейки Бенара.
- Реакция Белоусова-Жаботинского.

4. Реальные газы и жидкости.

- 4.1. Сжижение углекислоты. Опыт Кальете.
- 4.2. Сжижение метана.
- 4.3. Образование тумана при адиабатическом расширении воздуха.
- 4.4. Критическое состояние эфира.
- 4.5. Эффект Джоуля - Томсона.

5. Фазовые переходы.

- 5.1. Теплота испарения.
- 5.2. Кипение воды под колоколом насоса.
- 5.3. Замерзание кипящей воды.
- 5.4. Кипение при охлаждении.
- 5.5. Пленочное и пузырьковое кипение азота.
- 5.6. Кипение перегретой воды.
- 5.7. Испарение твердой углекислоты.
- 5.8. Возгонка нашатыря.
- 5.9. Ртутный молоток
- 5.10. Кристаллизация переохлажденного гипосульфита.
 - Теплота кристаллизации.
 - Рост кристаллов гипосульфита.
- 5.11. Зависимость температуры плавления парафина от давления.

6. Поверхностные явления.

- 6.1. Опыт Плато.
- 6.2. Изменение поверхностного натяжения.
 - Искусственная «амёба».
 - Движение камфары на воде.

- «Живые» капли ртути.
- 6.3. Мыльные пузыри и плёнки.
 - Зависимость давления от радиуса.
 - Плёнки на каркасах.
 - Работа мыльной плёнки.
- 6.4. Капиллярные явления.
 - Капилляры.
 - Клины.
 - Капиллярные силы.
 - Зависимость поверхностного натяжения от температуры.
- 6.5. Смачивание и несмачивание.
 - Вода в «решете».
 - Капли керосина и ртути на стекле.

7. Растворы.

- 7.1. Взаимное растворение жидкостей
- 7.3. Осмотическое давление

8. Свойства твердых тел

- 8.1. Модель теплового движения решетки.
- 8.2. Тепловое расширение металла.
- 8.3. Увеличение твердости при охлаждении.
 - Хрупкость резины.
 - Резиновый и свинцовый колокольчики.
- 8.4. Теплопроводность металлов.
- 8.5. Динамика распространения тепла в стержне.
- 8.6. Теплоемкость металлов.
- 8.7. Межмолекулярные силы. Плитки Иогансона.