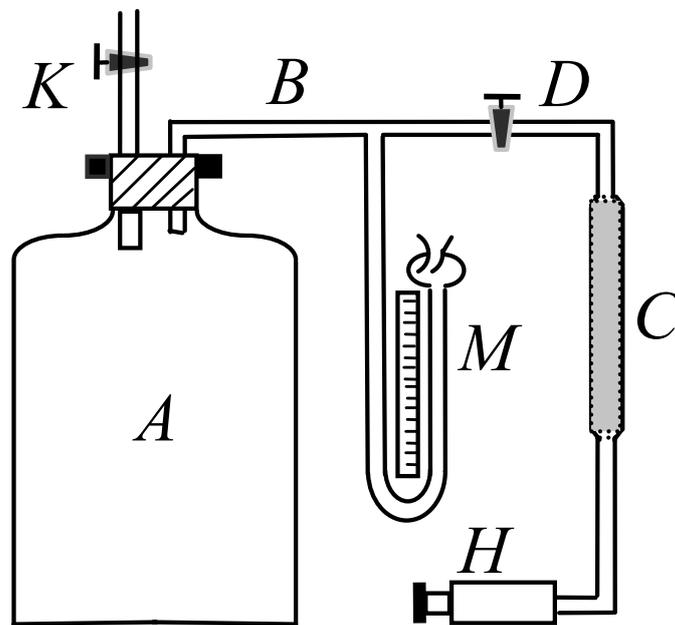


В.И. Козлов

АНТОЛОГИЯ ОБЩЕГО ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА

ЧАСТЬ 2

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА



2010

Физический факультет МГУ

В.И. Козлов

**АНТОЛОГИЯ
ОБЩЕГО ФИЗИЧЕСКОГО
ПРАКТИКУМА**

ЧАСТЬ 2

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

2010

Физический факультет МГУ

Козлов В.И. Антология общего физического практикума. Часть 2. Молекулярная физика – М: Физический факультет МГУ, 2010. – 172 с.

Общий физический практикум – весьма эффективная форма учебного процесса, позволяющая студенту увидеть изучаемые им физические явления как бы “живьем” и, более того, принять участие в их развитии. Очень важным при этом является необходимость студенту в беседах с преподавателями правильно, грамотно выражать свои мысли, свое понимание данного физического явления, понимание физических законов, описывающих это явление. За сто лет существования физического практикума созданы многие сотни лабораторных работ. В начале 2010 года на физическом факультете МГУ вышла книга В.И. Козлова “Антология общего физического праткикума. Часть 1. Механика”. В ней собран материал о студенческих лабораторных работах по механике, созданных в различных вузах нашей страны и в зарубежных учебных заведениях. Настоящая книга представляет лабораторные работы по молекулярной физике, опубликованные в многочисленных сборниках лабораторных работ различных вузов, в научных журналах и в материалах ставших обычными специальных научно-методических конференций, посвященных проблемам физического практикума.

Издание предназначено для преподавателей высшей школы, занимающихся научно-методической работой.

© В.И Козлов

© Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2010г.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
Глава 1	
ТЕРМОМЕТРИЯ.....	8
Глава 2	14
ТЕПЛООБМЕН	14
2.1. Нагрев и охлаждение газов	14
2.2. Нагрев и охлаждение твердого тела.....	30
2.3. Нагрев и охлаждение жидкостей.....	43
2.4. Определение механического эквивалента теплоты.....	48
2.5. Эффект Джоуля–Томсона	53
Глава 3	
ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА	54
3.1. Диффузия.....	54
3.2. Внутреннее трение.....	56
3.1. Теплопроводность.....	72
3.1.1. Теплопроводность газов.....	72
3.3.2. Теплопроводность твердых тел.....	79
3.3.3. Теплопроводность жидкостей	86
Глава 4	
БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ.....	88
Глава 5	
ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ	94
Глава 6	
ВЛАЖНОСТЬ.....	109

Глава 7

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ..... 112

Глава 8

ПОВЕДЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... 126

Глава 9

ВАКУУМ..... 138

Глава 10

ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД..... 145

Глава 11

ВОЛНЫ..... 147

Глава 12

РАЗНОЕ 150

Глава 13СБОРНИКИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ 164**Глава 14**

ДОПОЛНЕНИЕ..... 170

ПРЕДИСЛОВИЕ

В начале 2010 года на физическом факультете МГУ вышла в свет книга: В.И. Козлов. “Антология общего физического практикума. Часть 1. Механика”. В ней представлен материал, воссоздающий историю развития общего физического практикума. Настоящая книга является следующей частью составляемой Антологии, посвященной молекулярной физике.

В России первая книга, в которой были собраны описания лабораторных работ для студентов, вышла в свет в 1908 году. Это был “Физический практикум” профессора Московского университета А.П. Соколова. В последующие годы практикум физического факультета развивался, обогащался все новыми и новыми лабораторными работами. Большой вклад в развитие общего физического практикума внесли профессоры и преподаватели физического факультета К.П. Яковлев, А.А. Глаголева-Аркадьева, С.И. Вавилов, И.И. Васильева, Б.А. Введенский, Е.С. Четверикова, И.А. Яковлев, В.И. Иверонова, Р.В. Телеснин, К.Н. Баранский, Т.С. Величкина, А.Г. Белянкин, Л.П. Стрелкова, И.В. Митин, А.М. Салецкий и многие другие.

Большой вклад в расширение тематики лабораторных работ общего физического практикума внесли преподаватели других ведущих вузов (МФТИ, МИФИ и др.). В последние годы стали чаще публиковаться научно-методические статьи в различных журналах, стали проводиться специально посвященные практикуму научно-методические конференции. В связи с этим возникла необходимость собрать воедино все самое интересное, что было сделано для общего физического практикума, и сделать это легко доступным для преподавателей всех вузов. Антология общего физического практикума и представляет собой попытку реализовать эту идею.

В описаниях большинства лабораторных работ, как и в журнальных статьях и докладах на научно-методических конференциях, акцент авторами делается на какой-либо характеристике физического процесса, характеристике вещества, характеристике физического закона. Это, конечно, вполне оправданно. Но мне представляется, что в физическом практикуме, когда студент выполняет эксперимент, главным для него должен быть физический эффект, физическое явление, которое разворачивается перед его глазами. Исходя из этого, в настоящей книге я стремился произвести разбиение собранного материала по главам так, чтобы отдельные работы группировались именно по тому, какое физическое явление воспроизводится студентом в данной работе. Правда, при этом оказалось, что в ряде лабораторных работ реализуется не одно явление, а два или даже больше. Встречаются лабораторные работы, в которых авторами акцент делается на характеристике процесса, лишь формально используемой при его теоретическом описании. Так что произведенное распределение лабораторных работ по тематическим главам не является бесспорным.

Предназначение аннотаций, приводимых в большинстве ссылок на лабораторные работы – дать представление о физическом явлении, изучаемом в данной лабораторной работе, о методе его наблюдения. Они не предназначены ни для детального знакомства с устройством экспериментальной установки, ни для руководства при выполнении работы, ни для создания более или менее полного представления об изучаемом в лабораторной работе физическом явлении. При этом некоторые аннотации, пожалуй, чрезмерно длинны, но это можно объяснить еще не-

выработанностью критериев ограничения текста аннотаций и, в какой-то мере, личным интересом автора книги к тем или иным лабораторным работам.

В настоящей книге ссылка на ту или иную научно-методическую работу начинается с названия этой работы, как выражающего ее физическое содержание. Жирным шрифтом выделен год публикации каждой работы, что позволяет проследить хронологию представления той или иной темы в практикуме.

Основным источником материала для данной книги послужили следующие учебные пособия:

1. Соколов А.П. Физический практикум. Руководство к практическим работам по физике. Изд. второе, дополненное и переработанное проф. А.П. Соколовым и проф. К.П. Яковлевым. ОНТИ НКТП СССР. М.-Л. 1926. 374 с.
2. Соколов А.П. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. Изд. третье, значительно дополненное и переработанное В.Г. Корицким, Е.С. Четвериковой, Е.С. Щепотьевой. ОНТИ НКТП СССР. М.-Л. 1937. 464 с.
3. Соколов А. П. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. Изд. четвертое, значительно дополненное и переработанное В.Г. Корицким, Е. . Четвериковой, Е.С. Щепотьевой. ОНТИ НКТП СССР. М.-Л. 1938. 464 с.
4. Яковлев К.П. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Т. 3. Интерполирование и гармонический анализ. Элементы номографии. Лабораторная техника. Таблицы и формулы., ОГИЗ, Гостехиздат. М.-Л. 1945. 235 с.
5. Яковлев К.П. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Т. 1. Механика и общие свойства тел. Упругие колебания. Акустика. М.-Л., Гостехиздат, 1946. 239 с.
6. Соколов А.П. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. Т. 1. Механика и общие свойства тел. Упругие колебания. Акустика. ОГИЗ. Государственное изд-во технико-теоретической литературы. М.-Л. 1946.
7. Яковлев К.П. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Том второй. Молекулярные и тепловые явления. Электричество и магнетизм. Оптика и строение атома. М.-Л. 1949.
8. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Сост.: А.Г. Белянкиным, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. Изд. 2-е. Гос. изд. ф.-м. литературы. М., 1951.
9. Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Составлено: А.Г. Белянкиным, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. Гос. изд. ф.-м. литературы. М., 1953, 636 с.
10. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. [Для физ. и физ.-матем. фак. гос. ун-тов]. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Составлено: А.Г. Белянкиным, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. Гос. изд. ф.-м. литературы. М., 1955, 636 с.
11. Прокофьев В.И., Майсова Н.Н. Физический практикум. М., 1958.
12. Физический практикум. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. 1959. 137 с.
13. Вердеревская Н.Н., Иродов И.Е., Майкова В.И. и др. Под ред. проф. Савельева И. В. Физический практикум. МИФИ. М. **1960**. 119 с.
14. Вердеревская. Н.Н., Иродов И. Е., Майкова В.И. и др. Под ред. проф. И.В. Савельева. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть I. Москва, **1961**.

15. Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Составлено: А.Г. Белянкиным, Г.П. Мотулевич, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. Гос. изд. ф.-м. литературы. М., **1962**, 956 с.

16. Физический практикум. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть II. МИФИ. Кафедра общей физики. **1962**. В составлении сборника принимали участие: Г.Г. Аксенов, К.Т. Басова, Н.Н. Взоров и др.

17. Кортнев А.В., Рублев Ю.В., Куценко А.Н. Практикум по физике. Учебное пособие для студ. высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е, доп. М., “Высш. школа”, **1963**, 516 стр.

18. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. докт. физ.-мат. наук Л.Л. Гольдина. Составлено: Л.Л. Гольдиным, С.М. Козелом, Н.Н. Колачевским и др. Изд. “Наука”. М., **1964**, 580 с.

19. Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Гос. изд. ф.-м. литературы. М., **1965**.

20. И.Е.Иродов, Г.Н. Кутузова, В.И. Майкова и др. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть I. Москва, **1965**.

21. Г.Г. Аксенова, К.Т. Басова, Н.Н. Взоров и др. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть II. Москва, **1965**.

22. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Составлен: А.Г. Белянкиным, Г.П. Мотулевич, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. Изд. “Наука”. М., **1967**, 352 с.

23. Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Изд. “Наука”. М., **1973**, 688 с.

24. Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л. Л. Гольдина. Изд. “Наука”. М., **1983**, 704 с.

25. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. **1988, 1999**.

26. Л.Г. Деденко, Д.Ф. Киселев, В.К. Петерсон, А.И. Слепков. Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд-во моск. ун-та. **1991**, 269 с.

27. А.М. Салецкий, А.И. Слепков. Механика твердого тела. Лабораторный практикум. М. Физический факультет МГУ. **1999**, 82 с.

28. Гладун А.Д., Александров Д.А., Игошин Ф.Ф. и др. Лабораторный практикум по общей физике: Учебное пособие для студентов вузов. Т. 1. Механика. М.: Изд-во МФТИ. **2004**. 316 с.

Кроме того, были обработаны научные журналы, публикующие научно-методические работы, материалы научно-методических конференций, а также реферативный журнал “Физика”.

Я надеюсь, что собранный в настоящей книге материал окажется полезным для многих преподавателей высшей школы, занимающихся научно-методической работой.

*Доцент кафедры общей физики
физического факультета МГУ
доктор физ.-мат. наук В.И. Козлов*

Глава 1.

ТЕРМОМЕТРИЯ

Измерение температуры. К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. Гостехиздат. 1946. С. 51-55.

Описано устройство газового ртутного, электрического и оптического термометров. Указано, что в основе действия газового термометра лежит расширение газа (гелия, водорода, азота, воздуха). Область применения газовых термометров простирается от $-260,5^{\circ}\text{C}$ до 1500°C .

Действие ртутного термометра основано на расширении ртути, находящейся в жидком состоянии приблизительно в интервале от -38°C до 350°C .

Электрические термометры разделяются на термоэлектрические термометры и термометры сопротивления. Термоэлектрические термометры, обыкновенно называемые термопарами, основаны на термоэлектрических явлениях, при которых нагревание места спая двух проволочек из различных металлов сопровождается возникновением на их свободных концах электродвижущей силы. Нормальной термопарой служит термоэлемент Ле-Шателье, в котором применяются проволоки из чистой платины и сплава платины с родием. Применяются также термопары: золото – платина (область низких температур), никель – никрохром (до 900°C), железо – константан и некоторые другие.

Термометры с сопротивлением основаны на изменении электрического сопротивления металлической проволоки с температурой. Применяется преимущественно платиновая проволока.

Оптические термометры, обычно называемые пирометрами, применяются до самых высоких температур и известны в очень разнообразных формах.

Определение температуры электрической печи при помощи оптического пирометра. К.П. Яковлев. Физический практикум. Задача 26 d. М.-Л. 1949. С. 58.

Для измерения температуры раскаленных тел очень часто применяются различные типы оптических пирометров, действие которых основано на законах излучения абсолютно черного тела. В оптических пирометрах в большинстве случаев применяется принцип фотометрирования или сравнения яркости двух освещенных полей. Одно из них освещается раскаленным телом, температура которого подлежит определению, а другое – вторым источником света, яркость которого можно изменять в широких пределах. Весьма удобно пользоваться для этого электрической лампочкой накаливания, изменяя при помощи реостата силу питающего ее тока, которая определяет температуру волоска лампочки и одновременно яркость ее свечения. Градуируя лампочку, можно установить зависимость между температурой волоска лампочки и силой тока в ее цепи. Прибор, работающий на описанном принципе, называется пирометром.

Проверка основных точек ртутного термометра и определение его поправок. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, 1959. Работа 38. С. 118-120.

Для проверки точки 100°C испытуемый термометр помещают в сосуд с водой и нагревают. Термометр в парах кипящей воды держат до тех пор, пока столбик ртути манометра, также вставленного в сосуд, не перестанет подниматься. Истинная температура воды определяется по таблице с учетом знания давления ее паров. Для проверки другой основной точки термометр помещают в тающий лед, а затем в снег.

Градуирование термопары. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть III. М. 1961. Под ред. доц. О.И. Замша. Работа 7.С. 76.

Изготовление и градуировка термопар. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред проф. В.И. Ивероновой. Москва. Задача 25. 1962. С. 142-145. 1967. С.182-188.

В работе производится изготовление термопары (медь-константан), градуировка термопары, проверка одной точки градуировки по температуре плавления олова, уточнение нелинейности зависимости термоэлектродвижущей силы термопары от температуры.

Изучение газового термометра. С.С. Прилежаев. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Методич. пособие для студентов сан. ф-та мед. ин-та. Ленинград. 1962. С. 57-69.

Гидростатическая установка, развивающая давление 2 кбар, предназначенная для обучения и исследований. Stajdohar Ralph E., Towle Laird C. Two-kilonbar hydroststic-pressure system for teacheing and rescarch. "Amer. J. Phys." .1967, 35, № 1, 29-35. [РЖФиз. 1968].

Описывается сравнительно простое по конструкции и в работе устройство, развивающее давление до 2 кбар и позволяющее исследовать и продемонстрировать поведение материалов при высоком давлении. Необходимость в такого рода устройстве испытывают учебные и исследовательские физические, химические и биологические лаборатории. Принцип действия установки основан на постепенном (до выбранного уровня) добавлении нагрузки на длинное плечо рычага массивным грузом и передаче усилия через короткое плечо на цилиндр в камеру высокого давления. Приводятся подробности по выбору материалов, по проводке в камеру высокого давления электрических коммуникаций, предназначенных для измерения электрических параметров испытуемых образцов. Описывается порядок работы с установкой, подчеркивается безопасность. Практическое использование иллюстрируется результатами наблюдений за диэлектрической проницаемостью пентана, четыреххлористого углерода и нефти. В приложении обсуждаются эксперименты по изучению электропроводности и вязкости растворов, по исследованию кривых плавления материалов, по изучению магнитных и электрических свойств жидкостей.

Постоянная времени термометра. Time constant of a thermometer. Zanett, Vittorio. "Phys. Teach." 1983. 21, № 2. С. 108-110. [РЖ 1983 10А76].

Описывается учебный эксперимент по наблюдению и определению постоянной времени ртутного термометра. Рассматривается два режима охлаждения

предварительно нагретого термометра – в воздухе и в воде. Приводится математическая модель охлаждения термометра и дается объяснение причин, обуславливающих различие постоянных времени охлаждения термометра в обоих режимах.

Устройство для измерения давления насыщенных паров жидкостей. Захаров И.В., Рачек В.Ф.; Моск. физ.-техн. ин-т. А. с. 1026024, СССР. Заявл. 23.12.81, №3369785118-10, опубл. в Б.И., 1983, № 24, MKU G 01 L 7118. [РЖ 1984 №7. А101.]

Содержит резервуар с жидкостью, манометр сравнения, термостат, вакуумирующую и измерительную системы. Манометр сравнения выполнен в виде погруженной в жидкость вертикальной трубки с закрытым верхним концом в форме капилляра, термостат выполнен в виде термостатирующей оболочки, охватывающей верхнюю часть трубки, а резервуар выполнен съемным и сообщенным с вакуумирующей и измерительной системами. Изобретение может использоваться в качестве учебного прибора при изучении курса молекулярной физики.

Учебный прибор для изучения адиабатического процесса: А. с. СССР 1430981А1, MKU G09 B23.12. Ушаков В.В., Федоров И.С. Харьковский институт радиоэлектроники. № 4216907/31-12; Заявлено 26.03.87; опубликовано **15.10.88.** Бюллетень № 38. [РЖ 1989 4А102]

Газ сжимается в прозрачном цилиндре под действием поршня, на котором закреплен осветитель, направленный на фотопроводящий слой фотопотенциометра, расположенного снаружи цилиндра. Перемещение поршня осуществляется гидравлически под действием насоса. На горизонтальные пластины запоминающего осциллографа подается выходное напряжение фотопотенциометра, на вертикальные пластины – напряжение от датчика избыточного давления, размещенного в нижней полости цилиндра. По графику на экране осциллографа определяется показатель адиабаты.

Изучение работы термостата и градуировка термопары. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988. Лаб. работа 1.1. С. 15-22.

Изучается методика использования термостата для различных целей: термостатирования внутренней и внешней системы, для градуировки термопары и определения температуры плавления вещества. В процессе измерений происходит знакомство с работой контактного термометра и системой термостатирования.

Градуировка полупроводниковых термометров. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988, 1999. Лаб. работа 1.2. С. 22-26.

Осваиваются методы измерения температуры с помощью полупроводниковых термометров. Изучается метод измерения температуры с помощью полупроводникового диода в режиме постоянного тока, по вольтамперной характеристике, а также с помощью терморезистора. Осваивается также работа термостата, мостовой измерительной схемы и других приборов.

Полупроводниковые датчики для измерения температуры в лабораторных практикумах по физике. Шихов В.И. *Тезисы докл. III конф. Стран содружества “Соврем. физ. практикум”*. 1995. Москва. С. 141-142.

Использование преобразования давлений в лабораторных экспериментах. I. Экспериментальная проверка фундаментального уравнения статики жидкости. Применение в экспериментах по измерению плотности. Use of pressure transducers in laboratory experiments. I. Experimental verification of the fundamental equation of fluid statics. Application to density measurements. Victoria L., Molina. C., Arenas A., Ibanez J. A. *Amer. J. Phys.* 1996. 64, № 3. 317-321. [РЖ 1996 12A100]

Лабораторная работа “Проектирование измерителя температуры”. С.А. Казанцев, А.Х. Абдрахманова, Ф.М. Самигуллин. *Физ. образ. в вузах*. 1999. Т. 5. № 2. С. 84-89.

Сообщается о работе проектного характера для физического практикума по разделу “Электричество”. Работа связана с выбором оптимальных параметров схемы, предназначенной для компенсации влияния температуры окружающей среды на показания термопары. Вся работа выполняется на ЭВМ.

Изучение работы термостата и градуировка термопары. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Изд. моск. ун-та. 1999. Лаб. работа 1.1. С. 15-22.

В ходе работы нагревается жидкость в термостате, измеряется ее температура. По полученным данным строится градуировочный график термопары, определяется средняя чувствительность термопары по току, термический коэффициент электродвижущей силы термопары. После выключения нагревателя термостат охлаждается с помощью потока воды. По результатам измерения времени, за которое температура воды в термостате понизится на определенную величину, рассчитывается коэффициент теплоотдачи охлаждающей системы.

При нагреве термостата с помещенным в нем металлом галлием измеряется температура термостата в функции времени. После расплавления галлия нагреватель выключают и измеряют температуру термостата при его охлаждении. По графикам изменения температуры галлия в ходе его нагрева и охлаждения определяют температуру плавления и кристаллизации.

Микроволновые печи – не только на кухне. Microwave ovens-out of the kitchen/ Cresswell Sarah L., Haswell Stephen J.J. *Chem. Educ.* 2001. 78., № 7. 900-904. [РЖ 03.06-18A.155].

Микроволновые печи (МП), широко вошедшие в домашний обиход в 80-х годах 20-го столетия, используются в современных научных исследованиях. В обзоре написана история использования МП в научных и производственных отраслях за последние 15 лет. Микроволновое излучение применяется в настоящее время во многих отраслях науки (металлоорганика, синтез, неорганическая химия), пищевом производстве (экстракция, катализ, очистка). Сравнение с обычными методами нагревания (например, жидкостей) показывает, что в этих случаях происходит медленная конвекция, в МП излучение воздействует на дипольные молекулы и вызывает вибрацию связей, что приводит к быстрому на-

греванию во всем объеме. МП имеют большие перспективы, в частности, в учебных лабораторных практикумах.

Опыты и демонстрации в курсе общей физики с использованием термочувствительных плёнок и красок. Experiments and demonstrations of general physics subjects with thermo sensitive films and paints. Aleksander M., Klosowicz S. J., Borys W. *Proc. SPIE*. **2001**. 4759, 469-472. [РЖ 04.02-18А.155].

Цифровой электротермометр. Шихов В.И. Научные труды физ.-мат. ф-та ВГ ПУ: Сб. науч. ст., посвящ. 50-летию ректора ун-та проф. А.П.Лешукова. Вологда. **2001**. 100-102. [РЖ 03.10-18А.160].

Рассмотрена возможность использования полупроводникового р-п перехода в качестве датчика температуры и проанализирована схема простого цифрового электронного термометра для лекционных демонстраций и лабораторных практикумов по физике на основе таких датчиков. Исследования метрологических характеристик такого электротермометра показали, что нелинейность характеристики при калибровке термометра в одной точке не превышает 3 К, изменение напряжения питания в пределах ± 0.5 В приводит к погрешности измерения температуры ± 0.6 К. Реальная погрешность термометра в диапазоне 0–100°C не превышает ± 1.5 К, а инерционность меньше, чем у ртутного термометра. После настройки термометра оба подстроечных резистора можно заменить постоянными.

Изотермический теплопроводный калориметр: универсальный инструмент для изучения процессов физики, химии и биологии. The isothermal heat conduction: a versatile instrument for studying processes in physics, chemistry, and biology. Wadso L., Smith A.L., Shirazi H., Mulligan S. Rose, Hofelich Th. *J. Chem. Educ.* **2001**. 78, № 8. 1080-1086. 03.05-18А.140.

Почти все физические, химические и биологические процессы протекают с выделением (экзотермически) или поглощением (эндотермически) тепла. Для измерения количества тепла используются калориметры. Описан простой, но достаточно чувствительный изотермический теплопроводный калориметр и пять примеров, иллюстрирующих его действие: измерение теплоемкости твердых тел (физика), кислотно-основное титрование (химия), энтальпия испарения растворителей (физическая химия), гидратация цемента (неорганическая химия и материаловедение) и метаболизм насекомых (биология).

Совершенствование эксперимента по разделу “Тепловые явления” на основе использования термоэлектрического калориметра. Комаров В.А., Комаров Б.А. ФССО-01. Шестая Межд. конф. Ярославль. **2001**. С. 146-147.

Датчик для измерения температуры на поверхности цилиндрических тел. Королев В.И., Свешников В.К., Разинов А.В. *Пробл. учеб. физ. эксперим.* **2002** № 16, 47. 101-102. [РЖ 03.01-18А.165].

Предложен цилиндрический датчик для измерения температуры на поверхности цилиндрических тел. Использование в качестве рабочей жидкости глицерина позволяет измерять более высокие температуры, чем спиртовым датчиком аналогичной конструкции. Показано, что время нагрева датчика до уста-

новившейся температуры уменьшается с ростом температуры его внутренней стенки.

Интеллектуальный калориметр на основе лазера. A smart-laser-based calorimeter. Schneider Th., Politi M.J., Baptista M.S. *J. Chem. Educ.* **2002.** 79, № 4. 503-505. [РЖ 03.05-18А.142].

Предложен метод, который можно легко использовать в оснащенной приборами учебной лаборатории. Он четко демонстрирует положения термохимии, обеспечивает понимание термохимических методов на основе использования лазеров. Эта комбинация наверняка вызовет интерес у студентов и повысит их тягу к творчеству. Установка проста, недорога и основана на компонентах, легкодоступных в учебных лабораториях.

Датчик твердого, жидкого и газообразного состояния: изучение электромеханической системы. Solid-liquid-gas state transducer: A study of an electro-mechanical system. Meyer H.O. *Amer. J. Phys.* **2007.** 75, № 3. 197-202. [РЖ 08.12-18А.120].

Описывается датчик, чувствительный к состоянию окружения (газ, жидкость или твердая фаза). Он состоит из биморфного пьезоэлектрика, помещенного в среду. Изменение фазы среды влияет на свободу движения сенсора и таким образом меняет электрические свойства. Наблюдаемое поведение прибора объясняется простой моделью. Прибор просто конструируется, может быть теоретически проанализирован, иллюстрирует некоторые важные физические принципы и удобен для проведения экспериментов в учебной лаборатории среднего уровня.

Динамическая калориметрия для студентов. Dynamic calorimetry for students. Kraftmakher Y. *Eur. J. Phys.* **2007.** 28, № 2. 351-358. [РЖ 08.07-18А.130].

Глава 2

ТЕПЛООБМЕН

2.1. Нагрев и охлаждение газов

Определение термического коэффициента давления газов газовым термометром. А. П. Соколов. Физический практикум. 1926. Задача 18. С. 120. 1937, 1938. Задача 14. С. 143.

Использован воздушный термометр, который состоит из стеклянного баллона, наполненного сухим газом (воздухом, азотом, водородом). К этому баллону припаяна капиллярная трубка, соединяющаяся с более широкими трубками, в одной из которых находится ртуть, положение мениска которой и дает информацию, необходимую для определения термического коэффициента давления газа.

Определение отношения удельных теплот газов методом Клемана и Дезорма. А. П. Соколов. 1926. Задача 20. С. 131. 1937, 1938. Задача 20. С. 170.

Основным элементом установки является стеклянный баллон, который при помощи крана тройного хода может сообщаться либо с трубкой, ведущей к U-образному водяному манометру, либо с наружным воздухом, либо и с тем и другим одновременно. После выкачивания охладившийся воздух в баллоне нагревается, принимая температуру окружающего пространства, вследствие чего давление повышается и столб воды в манометре несколько падает. Когда давление окончательно установится, производят отсчет h разности уровней воды в обоих коленах манометра. Быстро поворачивая кран, устанавливают на один момент сообщение баллона с атмосферой, тотчас же приводя кран снова в первоначальное положение. Когда давление окончательно установится, производят второй отсчет разности уровней по манометру h_1 . Вычисление отношения удельных теплот газа производится по формуле $\gamma = h/(h-h_1)$.

Определение отношения удельных теплоемкостей воздуха методом адиабатического расширения. К.П. Яковлев. Физический практикум. 1949. С. 107.

В исходном состоянии в большом стеклянном сосуде находится некоторое количество газа; его объем, давление и температуру обозначим соответственно через v_0 , p_0 и t_0 . Изменим объем газа в сосуде, например, несколько уменьшив его. Для этого можно ввести в сосуд еще некоторое количество газа, очень небольшое. Препятствие газ в сосуде окажется несколько сжатым, т. е. его объем несколько уменьшится, а давление несколько возрастет. Если процесс сжатия произведен достаточно быстро, то этот процесс можно считать адиабатическим, поэтому температура газа несколько повысилась. В новом состоянии объем, давление и температура газа обозначим соответственно v_1 , p_1 и t_1 . Далее предоставим газу в сосуде охладиться, пока его температура не станет равной начальной температуре t_0 . Объем газа v_1 при этом останется без изменения, а давление несколько уменьшится, его величину обозначим через p_2 . Используя для описания указанных переходов газа уравнения Пуассона и Бойля-Мариотта, можно прийти к следующему выражению для отношения удельных теплоемкостей газа γ :

$$\gamma = \frac{p_1 - p_0}{p_2 - p_0},$$

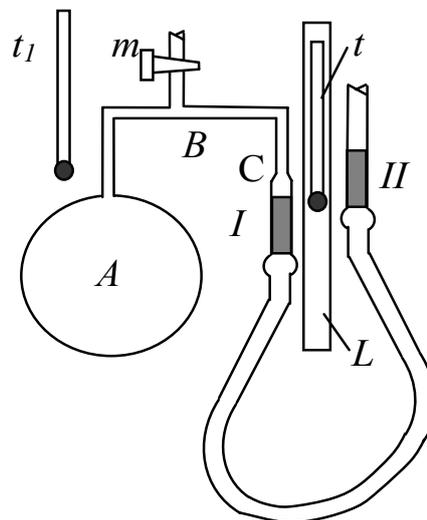
которое сводится к формуле

$$\gamma = \frac{h_0}{h_0 - h_2},$$

где фигурируют непосредственные отсчеты по манометру, пропорциональные интересующим нас давлениям газа.

Определение термического коэффициента давления газа при помощи газового термометра. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероной. 1951. Задача 18. С. 115-120. 1953. 1955. Задача 18. С. 117-122.

Для определения термического коэффициента газа употребляется газовый термометр, который состоит из стеклянного баллона, наполненного сухим газом (воздухом, азотом, водородом и т. д.). К баллону припаяна капиллярная трубка *B* с краном *m*. Этот кран служит для наполнения прибора сухим газом. В т. *C* припаяна более широкая трубка *I* диаметром около 10 мм, которая с помощью каучуковой трубки соединена с открытой трубкой *II*. Непосредственно у места соединения капилляра с трубкой *I* впаяно небольшое острие или просто на самом стекле нанесена черточка. Трубки *I* и *II* наполнены ртутью. Все эти части укреплены на вертикальной подставке с миллиметровой шкалой *L*. Сосуд *A* окружается тающим льдом, парами кипящей воды или просто водой желаемой температуры. Термометр *t* находится между трубками *I* и *II*.



Термический коэффициент давления газа α находится из соотношения

$$\frac{H_0 + H_1}{1 + \alpha t} = \frac{[1 + \gamma(t_2 - t_1)](H_0 + H_2)}{1 + \alpha t_2},$$

где $\gamma = 0,000025$ – термический коэффициент расширения стекла, а остальные величины определяются в ходе эксперимента.

Определение отношения удельных теплоемкостей газов. Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероной. 1951. Задача 20. С. 123-126. 1953, 1955. Задача 20. С. 125-128. 1962. Задача 44. С. 214-217. 1967. Задача 40. С. 203-206.

Прибор состоит из стеклянного баллона и соединенных с ним трехходового крана и водяного манометра. Баллон через упомянутый кран может присоединяться к ручному воздушному насосу. Сначала с помощью насоса нагнетают воздух в баллон. Затем кран поворачивают так, чтобы полость баллона полно-

стью изолировалась от воздуха комнаты. Когда давление воздуха в полости установится, по водяному манометру производят первый отсчет разности уровней в манометре h_1 . Затем поворотом крана устанавливается сообщение полости баллона с атмосферой на короткое время – чтобы процесс выхода избытка воздуха из баллона можно было считать адиабатическим – и с помощью крана опять изолируют баллон от сообщения с атмосферой. После установления давления в баллоне производят второй отсчет разности уровней в манометре h_2 . Отношение удельных теплоемкостей воздуха вычисляется по формуле

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} .$$

О законе Гей-Люссака. Пфейфер Ю. Zum Gay-Lussac'schen Gesetz. Pfeiffer Jurgen. Praxis Phys., Chem., Photogr., **1957**, 6, № 10, 270.

Описаны два опыта для экспериментальной проверки закона Гей-Люссака. Первый опыт дает лишь качественное подтверждение закона, но не дает точного значения коэффициента объемного расширения. Во втором опыте коэффициент объемного расширения получается равным 1/273.

Экспериментальное определение универсальной газовой постоянной. Беннетт. An experimental evaluation of the molar gas constant. Bennett George W. Proc. Pennsylvania. Acad. Sci., **1957**, 31. С. 124-127. [РЖ. 1960 № 10 25187].

Описывается студенческая лабораторная работа по экспериментальному определению универсальной газовой постоянной с использованием уравнения $PV=nRT$ и путем экспериментального определения давления, объема, числа молекул и температуры. В опыте используется калиброванный эвдиометр, представляющий стеклянную трубку диаметром ≈ 120 см. Для калибровки использован изопропиловый спирт, дающий возможность производить работу точнее, чем с водой. Газ, находящийся в эвдиометре, сжимается при помощи столба воды, перетекающей по гибкому шлангу из баллона при изменении высоты его положения. Давление определяется по высоте столба воды и барометру, объем – по эвдиометру, температура – по комнатному термометру. Опыт повторяется несколько раз. Результат отличается от табличного значения на 0,5 %.

Видоизменение опыта Рюхардта. Криста Ризер. Modification of Richardt's experiment. Christy R. W., Rieser L. M., Jr. *Amer. J. Phys.* 1958, 28, № 1. С. 37-38. [РЖФиз. 1958 № 12-26641].

Опыт Рюхардта (Ruchardt E., *Physik. Z.*, 1929, 30, 58) по определению $\gamma = C_p/C_v$ состоит в измерении периода колебаний стального шарика в вертикальной стеклянной трубке, вставленной в стеклянный баллон, наполненный воздухом. Видоизменение состоит в том, что баллон снабжается снизу вводом, позволяющим наполнять его различными газами и поддерживать колебания шарика, компенсируя неплотное соприкосновение шарика с трубкой. Приводятся результаты, полученные с He, Ar, H₂, CO₂ и воздухом. Для воздуха получено $\gamma = 1,38$. Обсуждаются некоторые технические вопросы, связанные с изготовлением прибора. Теоретически рассматривается механическая аналогия явления.

Определение отношения удельной теплоемкости воздуха c_p при постоянном давлении к удельной теплоемкости c_v при постоянном объеме по способу Клемана и Дезорма. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М. А. Большаниной. Томск, 1959. Работа 33. С. 107-115.

Определение термического коэффициента давления воздуха с помощью воздушного термометра. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М. А. Большаниной. Томск, 1959. Работа 37. С. 115-117.

Определение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении (c_p). Nimmerrichter Udo. Bestimmung der spezifischen Wärme der Luft bei konstantem Druck (c_p). "Prax. Naturwiss.", 1960, A9, № 6, "Physik", 160-161. [РЖФиз. 1961. 1A115].

Описывается метод быстрого определения c_p , не требующий специального оборудования. Некоторый объем воздуха проходит через стеклянную трубку, в которой находится накаливаемая электрическая спираль. Разность температур воздуха при входе и выходе из трубки измеряется при помощи термоэлементов. Удельная теплоемкость воздуха определяется по формуле: $c_p = cUt/\rho V\Delta\theta$, где c – механический эквивалент тепла, U – напряжение, I – ток, t – время, ρ – плотность воздуха, V – объем прошедшего воздуха, $\Delta\theta$ – разность температур. Чтобы заставить воздух протекать по трубке и при этом измерить его объем, поступают следующим образом: выходной конец стеклянной трубки при помощи резинового шланга соединяют с сосудом, наполненным водой. Если спускать воду через отверстие в нижней части сосуда, воздух потечет по стеклянной трубке, а объем вытекшей воды будет равен объему воздуха, протекшего через трубку.

Определение коэффициента расширения газов и барометрическое измерение высоты методом охлаждения. Malewski Bernhard. Bewstimmung des Ausdehnungskoeffizienten der Gase, sowie barometrische Höhenmessung mittels Eiskühlung. "Prax. Naturwiss.", 1960, A9, № 11, Physik, 296-297. [РЖ 1961 6A69].

Для определения коэффициента расширения газа (воздуха) используется литровая бутылка, соединенная при помощи Т-образной стеклянной трубки с медицинским шприцем и водяным манометром. Бутылку помещают в сосуд с водой при комнатной температуре, а затем в сосуд со смесью воды и снега. Поршень шприца перемещают до тех пор, пока давление не делается равным начальному, и по изменению объема рассчитывают коэффициент расширения газа.

Бутылку, соединенную с водяным манометром, помещают в сосуд со смесью воды и снега и переносят с нижнего этажа здания на верхний. При этом уровень воды во внутреннем колене падает. При помощи пипетки добавляют во внешнее колено столько воды, чтобы вода во внутреннем колене поднялась на прежний уровень. По разности уровня воды в трубке может быть рассчитано изменение давления в миллиметрах ртутного столба.

Определение скорости звука в газах и отношения удельных теплоемкостей методом стоячей волны. Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. М., 1962. Задача 45. С. 218-221. 1967. Задача 41. С. 206-209.

Основным элементом установки является труба, на концах которой установлены телефоны, выполняющие роль соответственно передатчика (от генератора) и приемника колебаний, которые затем подаются на осциллограф. На трубе помещена обмотка, служащая для изменения температуры газа внутри нее. Используется также раздвижная труба. Изменяя частоту генератора от 1000 до 3000 Гц, последовательно возбуждают в закрытой трубе стоячие волны. Установлению стоячих волн соответствует резкое увеличение амплитуды электрических колебаний, наблюдаемых на экране осциллографа. Скорость звука при разных температурах t вычисляется по формуле

$$v = 2l(\nu_{n+1} - \nu_n),$$

где ν_n и ν_{n+1} – частоты колебаний, при которых наблюдаются два последовательных состояния колеблющейся системы, при которых устанавливаются стоячие волны.

Определение скорости звука в воздухе и отношения C_p/C_v методом стоячих волн в трубке Кундта. Работа 5. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть II. МИФИ. Кафедра общей физики. 1962. В составлении сборника принимали участие: Г.Г. Аксенов, К.Т. Басова, Н.Н. Взоров и др. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г. И. Пантюхова. С. 25.

Определение скорости звука в воздухе и отношения C_p/C_v методом акустического резонанса. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть II. МИФИ. Кафедра общей физики. В составлении сборника принимали участие: Г.Г. Аксенов, К.Т. Басова, Н.Н. Взоров и др. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. 1962. Работа 6. С. 29.

Определение термического коэффициента упругости воздуха. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть II. МИФИ. Кафедра общей физики. В составлении сборника принимали участие: Г.Г. Аксенов, К.Т. Басова, Н.Н. Взоров и др. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. 1962. Работа 7. С. 31.

Определение отношения C_p/C_v для воздуха методом Клемана-Дезорма. Физический практикум. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. 1962. Работа 9. С. 47.

Проверка закона Гей-Люссака при помощи шприца, установленного вертикально. Ihler Fritz. Bestätigung des Gesetzes von Gay-Lussac mit Kolbenprober in vertikalem Aufbau. "Prax. Naturwiss.", 1963, A12, № 5, Physik, 121-122. [РЖФиз. 11А100].

Шприц устанавливают вертикально в стаканчике с водой, поршень уравновешивают при помощи груза, прикрепленного к нити, перекинутой через неподвижный блок. Если воду в стаканчике подогреть, давлением воздуха поршень выталкивается из цилиндра. Измеряя температуру воды термометром и соответствующие объемы воздуха в цилиндре, проверяют соотношение $V_2/V_1 = T_2/T_1$ и рассчитывают термический коэффициент упругости α . Шприц,

подставка для стаканчика с водой и неподвижный блок могут быть прикреплены к одному штативу.

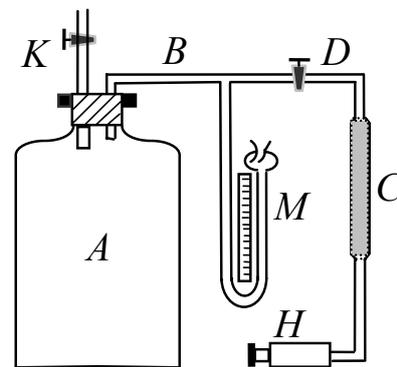
Два прибора для практикума по элементарному курсу физики. Pajares Diaz E. Dos aparatos para sendas practicas de fisica de caracter elemental. "Rev. cienc. apl.", 1963, 17, № 5, 399-405. [РЖФиз. 1964 5A88].

1) Прибор для изучения закона Бойля-Мариотта состоит из запаянной с одного конца стеклянной трубки с внутренним диаметром 1-1,5 мм, укрепленной так, что ее можно поворачивать в вертикальной плоскости на 90^0 по или против часовой стрелки от горизонтального положения. В трубку введено такое количество ртути, что она не выливается, когда открытый конец трубки повернут вниз. При горизонтальном положении трубки давление воздуха между ее запаянным концом и ртутью равно атмосферному. При отклонениях от горизонтального положения оно больше или меньше атмосферного на вертикальную составляющую веса ртути H . Измерив длины воздушного промежутка в трубке и вычисляя соответствующие значения H , проверяют закон Бойля-Мариотта. 2) Для вычисления механического эквивалента теплоты E укрепляют П-образную стеклянную трубку горизонтальным участком вниз, соединяют один из ее концов со стеклянным баллоном с гибкой металлической стенкой, помещенной в сосуд с охлажденной водой. Заливают в трубку ртуть и измеряют ее уровень. Затем заменяют воду в сосуде подогретой и выпускают часть ртути через кран в горизонтальной части трубки так, чтобы ее уровень в обеих вертикальных частях трубки стали одинаковыми. По количеству воздуха в баллоне и соединенной с ним части трубки, его температуре вычисляют E . Даны описание приборов, вывод формулы для работы с ними и оценка возможных погрешностей.

Определение C_p/C_v методом Клемана и Дезорма. Под ред. Л.Л. Гольдина. 1964. Работа 25. С. 150-154. 1973. Работа 24. С. 162-166.

Экспериментальная установка состоит из стеклянного баллона A (емкостью около 30 л), который сообщается с трубкой B , ведущей к небольшому ручному насосу H и к манометру M . Кран K позволяет сообщать баллон с атмосферой.

Воздух, поступающий в баллон из насоса, очищается от паров воды в сушильном аппарате C , наполненном порошком $CaCl_2$. С той же целью на дно баллона A наливается тонкий слой концентрированной серной кислоты. Избыточное, по сравнению с атмосферным, давление воздуха в баллоне A измеряется U-образным манометром, заполненным керосином. Сначала в баллоне газ находится при давлении, несколько превышающем атмосферное – при этом по манометру M производится отсчет h_1 . При открытии крана K газ начнет расширяться практически адиабатически. При закрытии крана M начинается медленное изохорное нагревание газа, в конце которого производится отсчет установившегося давления h_2 . Отношение удельных теплоемкостей воздуха вычисляется по формуле



$$\gamma = C_p/C_v = h_1/(h_1 - h_2).$$

Лабораторная работа “Измерение зависимости $\gamma = c_p/c_v$ от температуры для различных газов.” Cronin David J. The temperature variation of gamma for various gases: a student experiment. “Amer. J. Phys.”, **1964**, 32, № 9, 700-704. [РЖФиз. 1965 3A76].

Латунную трубку заполняют исследуемым газом и помещают в термостат, который обеспечивает термостатирование в пределах $77,4 \div 373$ К. Торцы трубы с обеих сторон закрыты пробками с вмонтированными наушниками. К одному из наушников подведен выход звукового генератора, другой – соединен с осциллоскопом. При изменении частоты генератора при определенных частотах обнаруживаются резонансы, которые отвечают соотношению $l = n\lambda_n/2$, где l – длина волны звуковых колебаний, n – порядок резонанса. По резонансной длине волны определяют скорость звука в газе v , с которой γ связана соотношением $\gamma = v^2 M/RT$. Точность измерения γ при введении поправки на замкнутость объема, в котором распространяется звук, равна 1 %. С помощью этой установки легко обнаруживаются характерные зависимости γ от температуры для многоатомных газов, нормального и пара-водорода.

Установка для определения c_p и c_v воздуха. Albrecht Hellmuth. Eine Versuchsanordnung zur Bestimmung von c_p und c_v der Luft. “Prax. Naturwiss.”, **1965**, A14, № 6, “Physik”, 149-152. [РЖФиз. 12A101].

Большой сосуд объемом 10 л при помощи Т-образной трубки, вставленной в пробку, соединяют резиновыми трубками с “измерительным сосудом” и с проекционным манометром. Измерительный сосуд состоит из горизонтально расположенного цилиндра, наполовину наполненного водой. Сосуд закрыт пробкой, в которую вставлены 2 трубки; через нижнюю может вытекать вода, через верхнюю поступает воздух. Воздух в большом сосуде нагревают при помощи электрического нагревателя, введенного в сосуд через пробку в нижней части. Длину проволоки нагревателя подбирают так, чтобы она не нагревалась до температуры красного каления. Время подогрева измеряют при помощи электросекундомера. При определении c_v измерительный сосуд отсоединяют. Воздух в большом сосуде нагревают при постоянном объеме, рассчитывают температуру воздуха и величину c_v по увеличению давления подогретого воздуха. Перед измерением c_p из измерительного сосуда выливают некоторое количество воды так, чтобы поверхность воды была на уровне нижней трубки. Затем включают подогреватель и нагревают воздух до тех пор, пока из трубки не выльется некоторое количество воды. Воду взвешивают и определяют – насколько расширился воздух, при этом рекомендуется подчеркнуть, что давление оставалось постоянным. Затем рассчитывают температуру воздуха и величину c_p . Приведены схемы установки, расчетные формулы, результаты измерений и анализ ошибок.

Определение термического коэффициента упругости воздуха. Физический практикум. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. Москва, **1965**. Работа 7. С. 31-33.

Определение отношения C_p/C_v для воздуха методом Клемана–Дезорма. Физический практикум. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. Москва, **1965**. Работа 9. С. 47-52.

Прибор для определения термического коэффициента давления воздуха. Лисенков Н.А. “Изв. высш. учебн. заведений. Физика”, 1965, № 1, 176-177. [РЖФиз. 1965 9А63].

Прибор для определения термического коэффициента давления воздуха состоит из термостатируемого резервуара с дифференциальным нульманометром, заполненным кремнийорганической жидкостью с малым давлением насыщенных паров. Давление в резервуаре уравнивается по нульманометру давлением воздуха в буферной емкости с помощью двух ручных насосов: всасывающего и нагнетающего. Изменение давления в буферной емкости измеряется водяным манометром. Преимуществом этого прибора по сравнению с другими является отсутствие ртути и высокая точность измерений. Прибор рекомендуется использовать для студенческого практикума.

Изучение зависимости термического коэффициента давления газа от температуры. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред проф. В.И. Ивероновой. 1967. Задача 35, с. 188-190.

Экспериментальная установка состоит из стеклянного баллона, заполненного воздухом при пониженном давлении, и вакуумметра, соединенного с баллоном резиновым шлангом. Баллон погружен в бачок, установленный на электрической плитке. Заполняют бачок снегом или водой комнатной температуры. По термометру, погруженному в бачок, отсчитывают температуру и записывают при этом показания вакуумметра. Затем включают электрическую плитку и начинают нагревать воду. По мере нагрева воды измеряют ее температуру в сосуде и отсчитывают соответствующее показание вакуумметра. По барометру-анероиду измеряют атмосферное давление. По результатам измерений строят график зависимости давления газа от его температуры. По крутизне наклона полученной линии и значениям давления газа при соответствующих температурах вычисляют значения термического коэффициента давления α для разных температур T . Зависимость $\alpha=f(T)$ представляют графически.

Изучение изотермического сжатия и расширения паров воды. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В.И. Ивероновой. 1967. Задача 55. С.261-264.

Установка состоит из системы цилиндрических сосудов, кранов, термоэлектрического и U -образного манометров, термостата. В два из используемых сосудов налито масло, которое играет роль поршня для сжатия или расширения исследуемых паров воды. В ходе работы измеряется давление насыщающих паров воды и изучается зависимость $p(V)$ при изотермическом расширении паров воды.

Уравнение Пуассона и опыт Рюхарда по определению отношения $k = c_p/c_v$. Kahra Johannes. Die Gleichung von Poisson und der Versuch von Ruchard zur Bestimmung des Quotienten $k = c_p/c_v$. “Prax. Naturwiss.”, 1967, A16, № 12, Physik, 328-331. [РЖФиз. 1968 8А85].

Опыт основан на упругих свойствах газа. В верхней части сосуда объемом 10 л устанавливают вертикальную трубку. В трубке может перемещаться шарик, диаметр которого равен диаметру трубки. Если опустить шарик в трубку, он начнет совершать гармоническое колебательное движение, при этом состояние

газа в трубке будет изменяться адиабатически. Приведен вывод формулы периода колебаний шарика, из которой следует, что период колебаний T зависит от $k = c_p/c_v$ таким образом, что, измерив T , можно рассчитать c_p/c_v .

Проверка эффекта Джоуля. Fajner D., Fargnioli G. Verfica dell' effeto Joule. "Giorn. fis. Soc. ital. fis.", 1968, 9, № 3, 215-217. [РЖ 1969 3А70].

Описывается эксперимент, подтверждающий закон Джоуля–Ленца. В сосуд, связанный резиновой трубкой с U-образной стеклянной трубкой, содержащей масло, помещается сопротивление, соединенное с внешней цепью. При нагревании сопротивления воздух расширяется и давит на масло. По изменению уровня масла в трубке можно судить о количестве выделенного тепла. Меняя напряжение на внешней цепи и измеряя изменения в уровне ртути, авторы получают данные, подтверждающие справедливость формулы $Q \approx I^2 RT$.

Определение C_p/C_v по скорости звука в газе. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Изд. 2-е. "Наука". 1973. Работа 25. С. 166-170. 1983. Работа 3.7. С. 208-212.

Измерение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Изд. 2-е. "Наука". 1973. Работа 26. С. 170-173.

Основным элементом установки является калориметр, представляющий собой стеклянную трубку с вакуумной теплоизолирующей оболочкой. Давление воздуха в вакуумной оболочке калориметра не превышает 10^{-5} мм рт. ст. Теплопроводность воздуха при таком давлении ничтожно мала. Обращенные в вакуум стенки калориметра посеребрены, что уменьшает потери тепла из-за излучения. Электронагреватель, укрепленный в калориметре, сделан в виде сетки. В процессе измерений он обдувается проходящим через калориметр воздухом и равномерно нагревает его. В цепь нагревателя включены амперметр и вольтметр, служащие для измерения мощности протекающего через нагреватель тока. Система реостатов позволяет регулировать силу тока, идущего через нагреватель. Для измерения температуры воздуха служит термопара. Один спай термопары расположен в струе воздуха, входящего в калориметр, второй спай – в струе выходящего нагретого воздуха. Проходя установку, газ заметно нагревается и расширяется, но практически не изменяет своего давления. Поэтому измеренная в установке теплоемкость является теплоемкостью при постоянном давлении. Расчет удельной теплоемкости воздуха производится по очевидной формуле

$$c_p = \frac{\Delta Q}{m\Delta T} = \frac{IV - N}{m\Delta T},$$

где IV – мощность, выделяемая нагревателем, N – мощность тепловых потерь, m – масса воздуха, проходящего через калориметр за единицу времени, ΔT – разность температур, измеренная термопарой.

Определение термического коэффициента давления газа. Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. Красникова В.И. и доц. Узикова А.Н. М., 1975. Лаб. работа № 12. С. 146-155.

Определение универсальной газовой постоянной методом откачки. Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. Красникова В.И. и доц. Узикова А.Н. М., 1975. Лаб. работа № 13. С. 156-160.

Изучение сжатия и расширения газа с использованием баскетбольного мяча. Sandin T. R. Compression and expansion using a basketball. "Phys. Teacher", 1976, 14, № 4, 246. [РЖ 1976 9А111].

Для иллюстрации нагревания и охлаждения газа при почти адиабатическом сжатии и расширении используется баскетбольный мяч и термистор (8 кОм) как датчик температуры. Мяч предварительно немного подкачивается, термистор помещается в клапанное отверстие. После установления теплового равновесия мяч сильно сдавливается, чем обеспечивается почти адиабатическое сжатие газа. Изменение температуры ведет к изменению сопротивления термистора на несколько процентов. После снятия нагрузки форма мяча восстанавливается и температура газа падает. При проведении опыта можно измерять ток через термистор или включить термистор в сбалансированный мост. В этом случае напряжение разбаланса через усилитель подается на демонстрационный гальванометр.

Эффект Джоуля-Томсона. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С. М. Козел и др. Москва. Наука. 1983. Работа 3.6. С. 198-207.

Об определении отношения теплоемкостей C_p/C_v методом Клемана-Дезорма в лабораторном практикуме. Корнич В.Г., Кубышкин А.А. "Изв. вузов физ." 1983, 26, №5. С. 115-116. [РЖ 1983 11А137].

Целью работы является совершенствование прибора для измерения C_p/C_v и изменение методики измерений с тем, чтобы иметь возможность выполнять измерения для различных газов. Основная идея конструкции нового прибора состоит в том, что количество и состав газа, заключенного в объеме прибора, не изменяется при проведении большого числа измерений. Подробно описана схема прибора. Предлагаемый прибор позволяет определить C_p/C_v двумя методами.

Способ определения упругости пара углеводородов. Рутьков Е.В., Тондегоде А.Я. Физ.-техн. ин-т им. А.Ф. Иоффе. А. с.1272195А1, СССР. Заявл. 04.05.84, №3759952/31-26, опубл. 23.11.87. Бюлл. № 43. МКУ 4 G 01№7/14, НКУ 536.423.15(088.8).[РЖ 1987 9А89П].

Описан лабораторный способ определения упругости пара углеводородов путем ввода углеводорода в камеру и измерения давления с помощью ионизационного манометра. Перед вводом исследуемого углеводорода в камеру помещают рениевый образец, нагревают его до 2400 К для удаления примесей, перед измерением давления рениевый образец нагревают до 2000–2300 К и упругость пара рассчитывают по формуле

$$P_{C_m H_m} = \frac{2 P}{\alpha_{H_2} n}$$

где $P_{C_m H_m}$ – упругость пара углеводорода; P – давление, измеряемое ионизационным манометром; α_{H_2} – чувствительность ионизационного манометра к водороду; n – число атомов водорода в молекуле исследуемого углеводорода.

Определение молярной газовой постоянной методом откачки. Физический практикум. Под ред Г.С. Кембровского. Минск. 1986. Работа 13. С. 125-126.

Определение молярной газовой постоянной методом изохорического нагревания. Физический практикум. Под ред Г.С. Кембровского. Минск. 1986. Работа 14. С. 127-128.

Определение отношения теплоемкостей газов. Физический практикум. Под ред Г.С. Кембровского. Минск. 1986. Работа 15. С. 128-132.

По результатам измерения температуры газа и скорости распространения звука в нем определяется значение $\gamma = C_p / C_v$ для этого газа.

Эксперимент по определению γ . An experiment to determine γ . Millar G. "Phys. Educ.". 1986. 21, № 2. 116-118. [РЖ 1986 10A111].

Описан эксперимент по определению отношения теплоемкостей газов $\gamma = C_p / C_v$. Установка состоит из открытого с одного конца вертикально расположенного цилиндра с изучаемым газом, в котором находится поршень. Цилиндр соединен короткой трубкой с датчиком давления, выходной сигнал которого, пропорциональный разности атмосферного и газового давлений, подается на цифровой вольтметр и далее на электронный осциллограф. Выведенный из состояния равновесия поршень совершает затухающие колебания, фиксируемые вольтметром и осциллографом. Период этих колебаний $T \sim (V/\gamma)^{1/2}$, где V – объем газа, γ определяется из наклона графиков зависимости $T^2(V)$ для объемов газа от 10 до 100 см³. Определены γ для воздуха, пропана, гелия и других газов. Точность измерений составляет 10%.

Учебный прибор для изучения адиабатического процесса: А. с. СССР 1430981А1, МКУ G09 В23/12/ Ушаков В.В., Федоров И.С. Харьковский институт радиоэлектроники – № 4216907/31-12; Заявление 26.03.87; опубликовано 15.10.88. Бюллетень № 38. [РЖ 1989 4A102]

Газ сжимается в прозрачном цилиндре под действием поршня, на котором закреплен осветитель, направленный на фотопроводящий слой фотопотенциометра, расположенного снаружи цилиндра. Перемещение поршня осуществляется гидравлически под действием насоса. На горизонтальные пластины запоминающего осциллографа подается выходное напряжение фотопотенциометра, на вертикальные пластины – напряжение от датчика избыточного давления, размещенного в нижней полости цилиндра. По графику на экране осциллографа определяется показатель адиабаты.

Определение отношения удельных теплоемкостей $\gamma = c_p / c_v$ в воздухе. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988, 1999. Лаб. работа 4.5. С. 109-113.

Экспериментальная установка состоит из стеклянного баллона, который может быть соединен с помощью распределительного крана либо с атмосферой, либо с насосом и манометром. Водяной U-образный манометр измеряет разность между давлением в баллоне и атмосферным давлением. Для определения отношения теплоемкостей $\gamma = c_p / c_v$ для газа (воздуха), находящегося в баллоне, с ним проводят определенную последовательность термодинамических процессов.

Определение теплоемкости воздуха c_p . П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988. Лаб. работа 2.2. С. 42-46. 1999. Лаб. работа 2.2. С. 42-46.

Эксперимент состоит в создании потока воздуха при постоянном его давлении через калориметр, где он нагревается с помощью специального нагревателя. После проведения эксперимента молярная теплоемкость воздуха вычисляется по формуле

$$c_p = \frac{WRT_1}{pI\Delta T},$$

где R – универсальная газовая постоянная; $\Delta T = T - T_1$, где T_1 – температура воздуха, входящего в калориметр, T_2 – температура воздуха на выходе калориметра; p – давление воздуха; I – объемный поток воздуха, протекающий через калориметр.

Для того, чтобы учесть потери тепла нагревателя на теплообмен с оболочкой калориметра, эксперимент проводят при разных скоростях потока воздуха и разных мощностях нагревателя.

Экспериментальная установка для изучения газовых законов. Павлюков В.К.; Камч. гос. пед. ин-т. – Петропавловск-Камчатский, 1989.-7с.: ил.-Рус.-Деп. в ВИНТИ 15.12.89. №7453-В89. [РЖ 1990 4А156ДЕП]

Рассматривается конструкция экспериментальной установки для изучения газовых законов. Установка позволяет непосредственно в ходе эксперимента автоматически вычерчивать графики зависимостей давления газа от его объема или температуры. Автоматическая запись графиков осуществляется с помощью самопишущего регистрирующего прибора – графопостроителя типа Н307'/1. Приведена принципиальная схема установки, подробно описаны конструкция отдельных узлов и принцип ее действия. В качестве примеров рассматриваются эксперименты по построению графиков зависимостей газа от его объема и температуры. Установка может быть использована как для проведения демонстрационного эксперимента, так и в лабораторном практикуме по курсу общей физики.

Лабораторная работа «Определение отношения c_p/c_v для газов методом измерения скорости звука». Каменецкая М.С., Петрова Е.Б. Сб. науч.-методич. ст. по физ. – 1991. № 16. С.89-91. [РЖ 1991 9А55]

Описана лабораторная установка для определения отношения теплоемкостей c_p/c_v для газов по измерению скорости звука методом акустического интерферометра.

Определение отношения удельных теплоемкостей для воздуха. Determination of a ratio of the principal specific heats for air. Deacon Christopher G., Whitehead J.P. *Amer. J. Phys.* 1992. 60, № 9. С. 859-860. [РЖФиз. 1993-8А108].

Предлагается эксперимент для определения отношения c_p/c_v , который может быть использован для постановки лабораторной работы для студентов младших курсов университета. В предлагаемом методе металлический шарик падает в вертикально расположенной стеклянной трубке, диаметр которой равен диаметру шарика. Трубка соединяется с воздушным резервуаром, в котором объем воздуха может достаточно точно регулироваться путем вливания известного объема воды. В эксперименте шарик совершает квазигармонические коле-

бания, период которых зависит от объема воздуха в резервуаре и от отношения теплоемкостей. Искомое отношение находится из крутизны наклона линейной зависимости квадрата периода от объема.

Измерение кривой давления водяного пара. Measurement of the vapour pressure curve of water. Fox J. N. *Phys. Educ.* **1993.** 28, № 3. С. 190-192.

Компьютеризованные эксперименты с газами в курсе термодинамики. Thermodynamic experiments on gases with a computer on-line. De Bernardis G., De Paz M., Pilo m., Sonnino G. *Phys Educ.* – **1994.** – 29, № 4. С. 222-229. [РЖ 1995 7A42].

Простой метод измерения термодинамических свойств. A simple method for measurement of thermodynamic properties. Byrne John P. *J. Chem. Educ.* – **1994.** – 71, № 6. – С. 531-533. [РЖ 1995 1A56].

Закон Мариотта. Loi de Mariotte. Prie P. *Bull. Union Phys.* – **1994.** – 88, № 767. – С. 1373-1375. [РЖ 1995 4A83]

Предложена установка, с помощью которой проверяется закон Мариотта. Основная часть установки – прозрачная вертикальная трубка длиной 1 м и диаметром 5-6 см. К верхней части трубки подсоединен демонстрационный манометр. Нижняя часть подсоединена к водопроводу. В верхней и нижней части установки имеются краны для соединения трубки с атмосферой и слива воды. При открытом верхнем кране трубка наполняется водой до высоты 40 см, устанавливается одно атмосферное давление. Работая водопроводным краном и краном слива воды, можно менять высоту столба воздуха в колбе. Во всех случаях произведение высоты столба воздуха в трубке на показания манометра остается постоянным.

Простой метод измерения термодинамических свойств. A simple method for measurement of thermodynamic properties. Byrne John P. *J. Chem. Educ.* **1994.** 71 № 6. С. 531-533. [РЖ 1995 1A56].

Изучение газа. Модель идеального газа. Etude d'une masse gazeuse: modele du gaz parfait. Tournier R. *Bull Union Phys.* – **1994.** – 88, № 765. – С. 1047-1052. [РЖ 1995 1A57]

Предложен эксперимент по проверке уравнения идеального газа. Цилиндр объемом 50 мл с движущим поршнем соединен с манометром, имеющим выход для соединения с аналого-цифровой вычислительной машиной. Проверяется выражение $PV=f(P)$. Показано, что для воздуха уравнение имеет вид: $PV=a+bP$. В качестве исследуемого материала использовали кислород и водород. Определены постоянные a и b .

Экспериментальные задачи разделов «Молекулярная физика» и «Термодинамика» курса общей физики. Литвик-Горская Л.Б., Пурышева Н.С., Луговая Г.Я., Черных А.В. Преподавание физики в высшей школе. **1995**, № 3. 36-42 [РЖ 1997 8A59].

Приведено несколько наиболее интересных задач по таким разделам курса, как: “Основные положения молекулярно-кинетической теории вещества: “Явления переноса в газах” и “Основы термодинамики”.

Оборудование для определения числа C_p/C_v для газов. Apparatus for the determination of the ratio of the principle specific heats of gases. Wilkinson B.J., Antal S.A. *Phys Educ.* **1995.** 30, №5. С. 301-303 [РЖ 1996 5A70]

Экспериментальные задачи в физическом практикуме. Бутырский Г.А. Пробл. учеб. физ. эксперим. **1996.** № 2. 45, 104. [РЖ 1997 10A147].

В качестве примера рассмотрен блок задач по теме “Кинетическая теория газов”, составляющих одну из работ практикума по молекулярной физике.

Изучение энтропии идеального газа на базе лабораторной работы “Определение C_p/C_v методом Клемана и Дезорма”. А.Б. Казанцева. *Преп. физики в высш. шк. Сб. науч. тр.* № 11. **1997.** С. 31-35.

Предлагается, практически не меняя измерительной части работы, включить в нее ряд добавочных расчетных заданий, чтобы на базе полученного экспериментального материала обсудить вопросы, связанные с энтропией идеального газа.

Эксперимент Рюхардта на границе механики и термодинамики. Aux confins de la mecanique et de la thermodynamique a travers l’experience de Ruchardt. Dieber A., Simond J.-P. *Bull. Union phys.* **1998.** 92. № 808. 1615-1631. [РЖ 1999 8A98].

В эксперименте для определения отношения γ теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме железный шарик помещался в стеклянную трубку и при изменении давления совершал затухающие колебания большой амплитуды. Составлено и решено дифференциальное уравнение этого процесса и получена формула, выражающая γ через параметры системы, температуру, давление и период колебаний.

Определение теплоемкости воздуха c_p . П.С. Булкин, И.И. Попова. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Изд. моск. ун-та. **1999.**

Эксперимент состоит в создании потока воздуха при постоянном его давлении через калориметр, где он нагревается с помощью специального нагревателя. После проведения эксперимента молярная теплоемкость воздуха вычисляется по формуле

$$c_p = \frac{WRT_1}{pI\Delta T},$$

где R – универсальная газовая постоянная; $\Delta T = T - T_1$, где T_1 – температура воздуха, входящего в калориметр, T_2 – температура воздуха на выходе калориметра; p – давление воздуха; I – объемный поток воздуха, протекающий через калориметр.

Для того, чтобы учесть потери тепла нагревателя на теплообмен с оболочкой калориметра, эксперимент проводят при разных скоростях потока воздуха и разных мощностях нагревателя.

Небольшое усовершенствование метода Рюхардта для измерения γ для воздуха с помощью лабораторных датчиков (на микрочипах) A simple extension of Ruchardt’s method for measuring the ratio of specific heats of air using

microcomputer-based laboratory sensors. Severn G. D., Steffensen T. *Amer. J. Phys.* **2001**. 69, № 3, 387-389. [РЖ 02.08-18А160].

Определение показателя γ адиабатического процесса. Смирнова Т.П., Евдокимова Л.А. Учеб. физ. **2001**. №6. 50-58, 64. [РЖ 03.11-18А.158].

Детально проанализирована работа физического практикума по молекулярной физике, в котором определяется отношение теплоемкостей воздуха.

Эксперименты с газами. Experiments con gases. Romera P.G. *Rev. esp. fis.* **2001**. 15. №1. 36-37. [РЖ 03.01-18А.163].

Экспериментальная задача на закон Бойля-Мариотта. Объедков Е.С. Учеб. физ. **2002**. №2, 6-7, 63. [РЖ 03.10-18А.155].

В установке использована герметично закрытая пробкой пластиковая бутылка с водой, в которой вверх дном плавает стеклянная пробирка, частично заполненная водой. К стенке пробирки прикреплена шкала, позволяющая определить объем воздуха. Давление изменяется сдавливанием бутылки руками.

К вопросу об определении отношения теплоемкостей воздуха методом выпуска из прибора части сжатого газа. Смирнова Т.П., Евдокимова Л.А. Пробл. учеб. физ. эксперим. **2002**. № 16. 55-57, 102. [РЖ 03.01-18А.164].

Рассмотрена простая установка для изучения процесса выпуска газа, позволяющая определить отношение молярных теплоемкостей воздуха в изобарическом и изохорическом процессах. Предложена модель изменения состояния газа при выпуске его части из прибора.

Адиабатическое сжатие и расширение воздуха. Громько Г.Г. Пробл. учеб. физ. эксперим. **2002**, № 16. 41-42, 101. [РЖ 03.03-18А.152].

Описан вариант опыта по адиабатическому изменению объема насыщенного водяным паром воздуха с использованием пластиковой бутылки.

Измерение атмосферного давления и свободного объема пористых тел манометрическим методом. Резник Е.Н., Шишкина Г.П. *Учеб. физ.* **2003**. № 2. 42-44, 72. [РЖФиз. 04.07-18А. 130].

Выполняемый с помощью компьютера эксперимент по измерению температурной зависимости скорости звука в воздухе. A computer-assisted experiment for the measurement of the speed of sound in air. Velasco S., Roman F.L., Gonzalez A., White J., A. *Amer. J. Phys.* **2004**. 22, № 2, 276-279. [РЖФиз 2006 10-18А.142].

Сконструирован простой прибор, с помощью которого можно продемонстрировать зависимость скорости звука в воздухе от температуры. Получены результаты для скорости звука и отношения удельных теплоемкостей для воздуха. Эксперимент может быть проведен за 1 час и доступен для демонстрации в учебном заведении.

Экспериментальная проверка закона Бойля и закона идеального газа. Experimental verification of Boyle's law and the ideal gas law. Ivanov D.T. *Phys. Educ.* **2007**. 42, № 2. 193-197. [09.03-18А.94].

Определение отношения C_p/C_v методом стоячей волны. Шевелев Е.С., Свиридов Ю.Н., Аверина И.П. 4 Региональная научно-практическая конференция студентов и курсантов. “Физика — проблемы, перспективы развития”. Тольятти, 23 марта **2007**: Сборник докладов, Тольятти, 2007. 61-63. [РЖ 08.12-18А.115].

Установка по определению C_p/C_v выполнена на современной базе, безопасна в работе, проста в эксплуатации. Цель работы — использование стационарной установки для измерения C_p/C_v , а также длины бегущей волны и фазовой скорости звука в газе. Решаются задачи изучения различных методов определения показателя адиабаты, проведения исследований с помощью установки. На установке проведены следующие упражнения: 1) определение длины стоячей и бегущей волны; 2) измерение фазовой скорости звука в воздухе при различных частотах; 3) измерение C_p/C_v . Приведена схема установки, расчетные формулы, результаты измерений. Установка может быть использована для демонстрации на лекционных и практических занятиях: индивидуального проведения экспериментальных задач. Установка может быть усовершенствована для определения влияния температуры на определяемые параметры.

Уточненный метод Клемана и Дезорма для определения отношения C_p/C_v . Медник П.М. *Физ. образ. в вузах.* **2008.** 14, № 2. 101-105, 143. [РЖ 09.10-18А.110].

Рассматривается метод Клемана и Дезорма для измерения отношения теплоемкостей газа $\gamma = C_p/C_v$, учитывающий условие постоянства числа частиц в системе. Выведенная формула позволяет получать более точные результаты измерений. При этом экспериментальная установка усложняется незначительно.

Экспериментальное исследование энтропии идеального газа в курсе общей физики. Булкин П.С., Миронова Г.А., Малова Т.И. *Физика в системе соврем. образования. Материалы X Межд.конф.* С.-Пб-г, **2009.** Т. 1. С. 39-40.

Для изучения газовых процессов в общем физическом практикуме физического факультета МГУ используется установка “КОБРА”. Газ заполняет стеклянный цилиндр. Объем газа изменяется с помощью поршня и измеряется по нанесенной на цилиндр шкале. Давление газа измеряется манометром, а температура соответствует температуре воды, находящейся в цилиндрической оболочке. Производится изотермическое расширение газа. Изменение молярной энтропии идеального газа в изотермическом процессе связано только с работой газа. Работа определяется путем графического интегрирования кривой $p(V)$. Полученная зависимость изменения молярной энтропии от величины $\ln(V/V_0)$ представляется графически. Для идеального газа изменение энтропии в изотермическом процессе описывается выражением $S(V) - S(V_0) = R \ln(V/V_0)$. Поэтому коэффициент угла наклона полученной прямой должен быть близок к значению газовой постоянной R . Сравнение изотермических зависимостей $\Delta S(V)$, полученных аналогичным образом при различных температурах, дает возможность определить температурную зависимость энтропии. Таким образом, данная лабораторная работа позволяет изучать поведение энтропии идеального газа в обратимых процессах без использования калориметрических измерений и сравнивать полученные экспериментально данные с рассчитанными теоретически.

2.2. Нагрев и охлаждение твердого тела

Определение коэффициента линейного расширения твердых тел. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Задача 17. С. 115.

Первый используемый метод – метод Лапласа и Лавуазье, в котором не измеряют непосредственную длину стержня при температуре нагревания, а только приращение этой длины, т. е. удлинение, величина которого довольно мала, а потому для ее точного измерения прибегают к чувствительным оптическим приемам. Второй метод – метод Фюсса, в котором используется сферометр.

Определение удельной теплоты твердых тел. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. С. 123.

Определение коэффициента линейного расширения твердых тел прибором Фюсса. А.П. Соколов. Физический практикум. 1937, 1938. Работа 13. С. 141.

Прибор Фюсса состоит из широкой стеклянной или металлической трубки с тремя боковыми отростками. Она служит ванной для нагревания исследуемого стержня, который вставляется внутрь ее. Нижний конец стержня опирается на конец вертикального микрометрического винта. Верхний конец стержня особым механизмом связан с коротким плечом легкого рычага, длинное плечо которого перемещается вдоль шкалы с делениями. Таким образом, вращая в ту или другую сторону микрометрический винт, можно всегда привести стрелку к нулевому делению шкалы. Это приспособление дает возможность замечать и измерять те незначительные изменения длины стержня, которые вызываются в нем нагреванием. Последнее достигается пропусканием через цилиндр струи водяного пара. Из разности показаний микрометрического винта при начальной температуре t_0 и при температуре паров t_1 определяют удлинение стержня и отсюда вычисляют коэффициент линейного расширения, пользуясь формулой: $\alpha \Delta l / l_0 (t_1 - t_0)$, где Δl – удлинение стержня при повышении температуры на $(t_1 - t_0)$ и l_0 – первоначальная длина стержня.

Определение удельной теплоемкости твердых и жидких тел. А.П. Соколов. Физический практикум. 1937, 1938. Работа 15. С. 146.

В первом упражнении для определения удельной теплоемкости твердых тел используется прибор Реньо. Прибор состоит из латунного нагревателя со впаянной в него наклонной трубой, внутрь которой вводится исследуемое тело. Калориметр состоит из двух цилиндрических сосудов из тонкой листовой латуни, наружного и внутреннего (собственно калориметра), которые отделены друг от друга эбонитовыми прокладками для исключения действия теплопроводности. Для уменьшения обмена теплотой через лучеиспускание поверхности цилиндров тщательно полируются. Во втором упражнении для определения теплоемкости жидких тел используется электрокалориметр Пфаундлера. Прибор состоит из двух одинаковых калориметров, наполненных каждый различной жидкостью. В каждый калориметр погружена спиральная проволока большого электрического сопротивления. Сопротивления проволок в обоих калориметрах делаются одинаковыми, и эти проволоки соединяются последовательно, вследствие чего при пропускании через них электрического тока они выделяют одинаковое количество тепла. Измеряя начальные и конечные температуры калориметров при пропускании через них электрического

тока, измеряют соответствующие температуры калориметров, что позволяет вычислить теплоемкость исследуемой жидкости. получают значения

Определение коэффициентов линейного расширения твердых тел при помощи микрометрического прибора. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Том второй. Молекулярные и тепловые явления. Электричество и магнетизм. Оптика и строение атома. К.П. Яковлев. Работа 30 а. М.-Л. 1949. С. 77.

В микрометрическом приборе то удлинение, которое испытывает тело при нагревании, измеряется при помощи микрометрического винта. Нагревание стержней создается действием простой паровой ванны. Величина коэффициента линейного расширения определяется по формуле: $\alpha = \Delta L / L_0(t_1 - t_0)$, где ΔL обозначает увеличение длины стержня L_0 при нагревании его от начальной температуры t_0 до температуры t_1 .

Определение коэффициента линейного расширения твердых тел при помощи компаратора. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Том второй. Молекулярные и тепловые явления. Электричество и магнетизм. Оптика и строение атома. К. П. Яковлев. Работа 30 б. М.-Л. 1949. С. 79.

Компараторы служат для сравнения мер и эталонов длины, а также для определения их температурных коэффициентов; по своему конструктивному оформлению эти приборы бывают очень разнообразными. Одна из наиболее распространенных форм компаратора лабораторного типа состоит из двух вертикальных микроскопов, установленных на расстоянии 50 см друг от друга на очень массивных чугунных клонках. Между колонками помещается масляный термомат, термически очень хорошо изолированный, с электрическим нагревателем. Коэффициент линейного расширения вычисляется по формуле $\alpha = \Delta L / L_0(t_1 - t_0)$, в которую входят измеряемые величины: L_0 – начальная длина стержня, ΔL – увеличение его длины при нагревании его от начальной температуры t_0 до температуры t_1 .

Определение удельной теплоемкости твердых тел при помощи водяного калориметра. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Том второй. Молекулярные и тепловые явления. Электричество и магнетизм. Оптика и строение атома. К.П. Яковлев. Работа 33 а. М.-Л. 1949. С. 101.

Водяной калориметр состоит из двух частей: во-первых, собственно калориметра и, во-вторых, водяного нагревателя или термостата для получения температуры 100°C . Исследуемое тело помещается в специальную трубку, находящуюся в парах кипящей воды. При этом оно удерживается в середине трубки с помощью нити. По достижении телом температуры 100°C оно на нити быстро опускается в воду. Удельная теплоемкость исследуемого тела вычисляется по формуле

$$c = \frac{(M + W)(t_0 - \theta)}{m(\theta - t)}$$

где M – теплоемкость воды, налитой в калориметр, W – водяной эквивалент калориметра, m – масса исследуемого тела, t_0 – температура воды в калориметре в

момент погружения в него исследуемого тела, t – начальная температура тела, которая равна температуре кипения воды в нагревателе, θ – максимальная температура, до которой нагреется вода в калориметре, т. е. его температура после наступления теплового равновесия.

Определение теплоемкости металлов методом охлаждения. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред проф. В.И. Ивероновой. Составлено: А.Г. Белянкиным, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. М.-Л. **1951**. Задача 22.С. 128-130. **1953, 1955**. Задача 22. С. 130-132. **1962**. Задача 27.С. 148-150. **1967**. Задача 38. С.196-198.

Металлический образец, имеющий температуру выше температуры окружающей среды, охлаждается, причем скорость охлаждения зависит и от величины теплоемкости металла. Сравнивая кривые охлаждения (температуры в функции времени) двух образцов, один из которых служит эталоном(его теплоемкость и скорость охлаждения должны быть известны), можно определить теплоемкость другого, если определить скорость его охлаждения.

В состав экспериментальной установки входит электропечь. Образец представляет собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 5 мм с высверленным каналом с одного конца. Этим каналом образец помещается на фарфоровую трубку, через которую пропущены проволоки термодпары. После нагрева образца измеряют его температуру с помощью гальванометра, подсоединенного к термодпаре, через каждые 10 секунд. Получающиеся в опыте кривые $T=f(t)$ переводятся в кривые $\partial T(t)/\partial t$, по которым и определяется теплоемкость металла как функция температуры $C(T)$.

Закон охлаждения Ньютона. Ландегрен Г.Ф. Newton's law of cooling. Landegren G.F. *Amer. J. Phys.*, **1957**, 25, № 9, 648-649. [РЖФиз. 1958 № 11 24351].

Отмечая, что обычная демонстрация опыта по определению коэффициента линейного расширения в курсе физики слишком кратковременна и занимает лишь часть отведенного лабораторного времени, автор рекомендует некоторое видоизменение опыта, позволяющее учащемуся получить экспериментальные точки кривой, определяемой законом охлаждения Ньютона. Приведены кривая и математический вывод уравнения кривой.

Прибор для определения коэффициента линейного расширения. Белозеров А.В., *Уч. зап. Ленингр. гос. пед. ин-та им. А.И. Герцена*. **1958**. 197. С. 238-240. [РЖФиз. 1959, № 12, 26444].

Прибор состоит из трубки кварцевого стекла, в которую помещается испытуемое тело длиной на 8-10 см меньше кварцевой трубки, сделанное в виде стержня или трубки. Положение испытуемого тела удерживается пробкой, вставленной в кварцевую трубку. Через пробку проходит стерженек, к которому прижимается индикатор, показывающий изменение длины тела. Кварцевая трубка с испытуемым телом помещается в нагреватель, представляющий собой металлическую трубку, в которую пропускается водяной пар. Прибор укреплен в трубе при помощи пробки. Коэффициент линейного расширения определяется с точностью 1,7 %.

Определение коэффициента линейного расширения твердых тел по способу Д. И. Менделеева. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, **1959**. Работа 39. С. 120-123.

Определение коэффициента линейного расширения твердых тел при помощи прибора Фюсса. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, 1959. Работа 40. С. 123-125.

Определение удельной теплоемкости твердых тел калориметром. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, 1959. Работа 41. С. 125-128.

Определение термического коэффициента линейного расширения твердых тел с помощью оптиметра. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть II. МИФИ. Кафедра общей физики. В составлении сборника принимали участие: Г.Г. Аксенов, К.Т. Басова, Н.Н. Взоров и др. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. 1962. Работа 8. С. 34.

Эксперимент по проверке второго закона термодинамики с помощью термоэлектрического прибора. Experiment to verify the second law of thermodynamics using a thermoelectric device. Gupta V.K., Shanker Gauri, Saraf B., Sharma N.K. "Amer. J. Phys." 1964. 52, №7. С. 625-628. [РЖ 1984 12A115].

Предлагаемый эксперимент базируется на точном измерении количества тепла и расчете температурного баланса установки типа термопары, представляющей собой слоистую структуру проводников р и n, соединенных послойно и находящихся в контакте с нагревателем и холодильником. В эксперименте реализуются два режима работы – режим теплового двигателя, основанного на эффекте Зеебека, и режим теплового насоса – на эффекте Пельтье. В первом случае анализируется тепло, выделяемое на сопротивлении нагрузки за счет протекания термотока, во втором – тепло Пельтье. Точный учет обратимых тепловых процессов и необратимых (потери в виде джоулева тепла) позволяет проверить справедливость второго начала термодинамики, записанного для к.п.д. идеальной тепловой машины через температуры нагревателя (T_n) и холодильника (T_x) в виде $\eta = (T_n - T_x) / T_n$.

Определение термического коэффициента линейного расширения твердых тел с помощью оптиметра. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть II. Г.Г. Аксенова, К.Т. Басова, Н.Н. Взоров и др. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. Москва, 1965. Работа 8. С. 34-46.

Прибор для определения термического коэффициента линейного расширения. Панич К.И. В сб. "Приборы по физ. и астрон." М. "Просвещение", 1968, 77-79. [РЖ 1969 3A69].

Нагревательный элемент (остеклованное проволочное сопротивление 150-200 Ом) установлен на двух стальных стойках и включается в сеть 127 В. В канале керамической трубки нагревательного элемента помещаются 2 металлических стержня: латунный, предназначенный для измерения температуры, и исследуемый. Каждый из стержней одним концом закрепляется неподвижно, а другим – упирается в толкатель. Описано применение прибора для определения термического коэффициента расширения.

Линейное расширение. Hoffmann Herbert. Langenausdehnung. "Prax. Naturwiss.", 1969, Teil 1, 18, № 6, 150-152. [РЖ 1970 1A63].

Описаны три опыта, связанные с изучением закона линейного расширения: зависимость изменения длины от изменения температуры, линейного расширения от первоначальной длины и изменения линейного расширения от материала. Проведение этих опытов приводит к экспериментальному получению закона линейного расширения $l = l_0(1 + \alpha t)$.

Определение удельной теплоемкости сыпучих гранулированных материалов методом свободного падения при электрическом нагреве. Chaudharu D.R., Kumar Veerendra. A continuous fall electrical method for measuring the specific heat of loose granular materials. "Amer. J. Phys.", 1972, 40, № 8, 1176-1177. [РЖ 1973 1A55].

Описана экспериментальная установка для определения удельной теплоемкости сыпучих гранулированных материалов (песок, соль и т. п.). Основным элементом конструкции установки является электрический спиральный нагреватель, помещенный в трубку термосного типа с двойными посеребренными стенками. Промежуток между стенками вакуумирован (откачан). Исследуемый материал поступает из верхнего резервуара в трубку и нагревается. Температура нагрева, которая зависит от скорости падения, измеряется при помощи медно-константановой термопары. Приведены соответствующие расчетные уравнения и величины удельных теплоемкостей, полученных в эксперименте для различных сортов песка, соли и золы.

Определение теплоемкости твердых тел. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Изд. 2-е. "Наука". 1973. Работа 27. С. 173-177.

Установка состоит из калориметра с пенопластовой изоляцией. Внутренние стенки калориметра выполнены из материала с высокой теплопроводностью. Надежность теплового контакта между телом и стенками обеспечивается их формой: они имеют вид усеченных конусов и плотно прилегают друг к другу. В теплоизолированную стенку калориметра вмонтированы электронагреватель и термометр сопротивления. Основная расчетная формула работы для теплоемкости тела C имеет вид:

$$C = \frac{P - \lambda(T - T_k)}{\Delta T / \Delta t},$$

где P – мощность нагревателя, λ – коэффициент теплопроводности стенок калориметра, T – температура стенок калориметра, T_k – температура окружающего калориметр воздуха (комнатная), Δt – время, в течение которого идет нагревание. Эта формула определяет теплоемкость тела вместе с калориметром. Теплоемкость калориметра должна быть измерена отдельно и вычтена из результата.

Погрешности, связанные с утечкой тепла, оказываются небольшими, если не давать телу заметных перегревов и производить все измерения при температурах, мало отличающихся от комнатной. Однако при небольших перегревах возникает большая ошибка в измерении $\Delta T = T - T_k$, и точность определения теплоемкости не возрастает. Чтобы избежать этой трудности, в работе предлагается следующая методика измерений. Зависимость скорости нагревания тела $\Delta T / \Delta t$ от температуры измеряется в широком интервале изменения температур. Температура измеряется термометром сопротивления, который представляет собой медную проволоку, намотанную на теплопроводящий каркас внутренней

стники калориметра, По полученным значениям строится график $\Delta T/\Delta t = f(T)$. Этот график экстраполируется к температуре $T=T_k$ и, таким образом, определяется скорость нагревания при комнатной температуре $(\Delta T/\Delta t)_{T=T_k}$. Окончательная формула для вычисления теплоемкости тела имеет вид:

$$C = \frac{PR_k \alpha}{\left(\frac{dR}{dt}\right)_{T_k} (1 + \alpha T_k)},$$

где R_k – сопротивление термометра при комнатной температуре, α – температурный коэффициент сопротивления меди.

Определение теплоемкости металлов методом охлаждения. Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Под ред. А.П.Максименко. Днепропетровский. гос. ун-т. 1973. Работа № 1-19. С. 118-123.

Опыт по изучению линейного расширения проволоки. Fiesseer Luts. Ein Versuch Zur Messung der Längenausdehnung von Drächten. "Prax. Naturwiss", 1973, Teil 1, 22, № 10, 256-257. [РЖ 1974 3А86].

Предлагается установка, позволяющая измерить линейное расширение проволоки различного диаметра и из различных материалов. В отличие от существующих dilatометров прибор позволяет определить коэффициент линейного расширения тел в широких температурных пределах, так как нагрев производится не жидкостью, а горячим воздухом. Прибор состоит из стеклянной трубки ($l=640$ мм и $d=35$ мм), теплоизолированной от окружающей среды посредством пенопласта. Проволока натягивается вдоль оси трубки; один ее конец закрепляется с помощью муфты, а другой с помощью рычага. Изменяя длину меньшего плеча (4,8 или 20 мм), получают следующие передаточные соотношения 1:100, 1:50, 1:20. Указатель длиной 400 мм одновременно натягивает проволоку. Горячий воздух в трубку нагнетают феном. Температура в трубке контролируется термометром, установленным так, что его показания легко считываются. Чтобы фен давал температуру воздуха $30 \div 100^\circ$, его начальную цепь размыкают и выводят к двум клеммам на ручке прибора. Для регулирования силы тока накаливания к клеммам подключают ползунковый реостат на 320 Ом. В качестве шкалы используется масштабная линейка. Таким образом, передаточному соотношению 1:100 соответствуют показания стрелки 10 мм и линейное удлинение 0,1 мм. Отмечая по термометру разность температур, вычисляют коэффициент линейного удлинения. Приводятся схема установки и полученные с ее помощью графики зависимости линейного удлинения Cu и Fe от температуры нагревания.

Количественный эксперимент с биметаллической пластиной. Hewson Peter W. The bimetallic strip – a quantitative experiment. "Phys. Teacher". 1975, 13, № 6, 350-352. [РЖ 1976 2А121].

Описан простой эксперимент по количественному измерению зависимости изгиба пластинки от температуры с использованием тонких биметаллических пластинок. Используется полоска из латуни и инвара со средней толщиной 0,26 мм, шириной ~ 10 мм и эффективной длиной 81 мм. Один конец пластинки закрепляется в держатель так, чтобы пластинка располагалась горизонтально и

изгиб её происходил также в горизонтальной плоскости. На другом конце пластинки припаивается тонкий вертикальный указатель. Для измерения температуры пластинка погружается в стакан с подогретой водой. Указатель при этом остается вне воды и позволяет измерить угол поворота свободного конца пластинки. Измерение этого угла производится с помощью метровой линейки, расположенной горизонтально на расстоянии 1 метра от держателя пластинки. Если смотреть со стороны линейки, то можно отметить места, через которые проходит воображаемая прямая, проведенная через концы биметаллической пластинки. Угол поворота свободного конца пластинки практически линейно изменяется с температурой и достигает 30° при изменении температуры на 60°C . Приведена формула для вычисления угла поворота.

Термодинамическая взаимосвязь объемных и упругих физических величин. Определение температурных коэффициентов длины на дилатометрической установке. Абсолютный метод. – аппроксимация эмпирической зависимости полиномом третьей степени. Оценка коэффициентов полинома и их доверительных границ процедурой уточнения по методу наименьших квадратов. О.Б.Васильев, М.Ф. Вукс, Р.В. Григорьев и др. Физический практикум с применением ЭВМ. Выпуск 2. Ленинград. 1977. Работа № 1. С. 45-52.

Новые лабораторные работы по курсу общей физики (Измерение коэффициента линейного расширения твердых тел методом муара). Арабаджи В.И. Сб. научно-методич. статей по физике. М.В. школа. Вып.5. 1977. С. 46-50.

Эксперимент по охлаждению с помощью конвекции. An experiment of cooling by convection. Armstrong H.L. "Phys. Educ." 1983. 18, №1. С. 43-44. [РЖ 1983 10A75].

Описывается учебный эксперимент, выполняемый на втором году программированного курса физики по разделу "Термодинамика" и заключающийся в измерении зависимости падения напряжения U_n на концах нагреваемой электрическим током никелевой проволоки (длина 1.5 м, диаметр 0.25 мм), а следовательно, и ее температуры от различных параметров. Рассматриваются 4 различных исследования, проводимых в процессе эксперимента: 1. Измерение U_n в условиях свободной конвекции при различных фиксированных значениях тока в диапазоне 0-2 А; 2. Аналогичные измерения в условиях принудительного обдува проволоки с помощью вентилятора; 3. Измерения U_n при фиксированном значении тока и разных скоростях обдува; 4. Измерение зависимости U_n от расстояния между проволокой и дополнительным тепловым экраном. Приводится методика объяснения наблюдаемых явлений и указываются области их практического применения.

Тепловая машина, основанная на термическом расширении. Thermal-expansion heat engine. Blanchard C.H. "Phys.Teach." 1983. 21, № 5. С 319. [РЖ 1983 11A139].

Описана конструкция простой тепловой машины, совершающей механическую работу за счет термического расширения. Стержень из Al диаметром 1 см и длиной 0.5 м попеременно нагревается газовой горелкой и охлаждается льдом. Расширяющийся при нагреве стержень посредством пружинного толкателя вращает зубчатое колесо (диаметром 5 см с 240 зубцами по периметру). Обратный ход колеса в процессе охлаждения стержня предотвращается храповым

механизмом. Цикл нагрева-охлаждения, сопровождающийся поворотом колеса на 1 зубец, длится $3 \div 5$ мин.

Исследование термических эффектов, возникающих при упругих деформациях. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Москва. Наука. 1983. Работа 3.13. С. 244-251.

Исследуемый образец резины расположен внутри кожуха из оргстекла и закреплен по торцам в двух зажимах. Верхний зажим неподвижен, а нижний может перемещаться вдоль двух вертикальных направляющих. Положение нижнего зажима определяется с помощью линейки. К подвижному зажиму подвешена легкая платформа, расположенная снаружи кожуха. Резина растягивается грузом, помещаемым на платформу. Для измерения тепловых эффектов, возникающих при растяжении или сжатии резины, используется дифференциальная термопара хромель-копель. Максимальное изменение температуры резины, наблюдаемое в работе, составляет несколько десятых градуса. Экспериментальная часть работы состоит из двух заданий. В первом из них исследуется процесс изотермического растяжения резины и проверяется формула

$$f = \frac{E(T)\sigma_0}{3} \left[\lambda - \frac{1 + 3\alpha(T - T_0)}{\lambda^2} \right],$$

где f – сила, растягивающая резину, E – модуль Юнга резины, пропорциональный абсолютной температуре, σ_0 – начальное поперечное сечение образца, $\lambda = l/l_0$ – относительное удлинение резины, α – коэффициент теплового расширения резины, T_0 – начальная температура резины, T – температура резины после деформации; при этом измеряется модуль Юнга. Во втором задании исследуются термические эффекты, сопровождающие адиабатическое растяжение и сокращение резинового образца.

Определение теплофизических характеристик неметаллических материалов. Физический практикум. Под ред. Г.С. Кембровского. Минск. 1986. Работа 21. С. 150-155.

Измеряются основные теплофизические характеристики дерева импульсным методом.

Определение теплофизических характеристик металлов. Физический практикум. Под ред. Г.С. Кембровского. Минск. 1986. Работа 22. С. 155-159.

Измеряются основные теплофизические характеристики алюминия методом тепловых волн.

Определение теплоемкости металла импульсным методом. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988. Лаб. работа 2.3. С. 46-52. 1999. Лаб. работа 2.3.С. 46-52.

Измеряется зависимость теплоемкости твердого тела (вольфрама) от температуры. В ходе работы изучается импульсный калориметрический метод измерения теплоемкости. Осваивается компенсационный метод измерения малых колебаний температуры с помощью дифференциального осциллографа. Образец

периодически нагревается короткими импульсами тока длительности t_u с частотой повторения f . В установившемся режиме температура образца будет периодически колебаться вблизи некоторого среднего значения T . Величина T определяется средней мощностью, рассеиваемой в образце. Во время действия каждого импульса тока температура образца каждый раз повышается на некоторую малую величину ΔT . В остальную часть периода температура на столько же снижается. Рост температуры на ΔT ведет к увеличению сопротивления образца r на величину Δr . Измерение величин r и Δr позволяет рассчитать теплоемкость и температуру образца.

Определение теплоемкости и теплоты плавления олова. П.С. Булкин. Под ред А. Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988. Лаб. работа 2.4. С. 52-58.

Используется калориметрический метод, в котором измеряется температурный ход калориметра при остывании за счет теплообмена с оболочкой (термостат). В процессе измерений производится поочередное охлаждение трех тел: пустой капсулы, капсулы с эталонным веществом (медь) и капсулы с оловом от температуры $T_1 > T_{\text{плав}}$ до $T_2 < T_{\text{плав}}$.

Исследование теплового расширения твердых тел (металлов). И.Т., Сергиенко В.П., Зорька А.В., Осауленко С.С. Сб. научно-методич. статей по физике. М. В. школа. Вып.14. 1988. С. 61-67.

Способ определения теплофизических характеристик твердых тел. Никитенко Н.И., Данилевич С. Ю., Грицай А.Г. А. с. 1673941 А1, МКИ G01 № 25/18. Ин-т технич. теплофиз. АН УССР. № 4695194125. Заявл. 27.03.89. Опубл. 30.08.91. Бюлл. № 32. [РЖФиз. 1992-6А73П].

Изобретение относится к теплофизическим измерениям и может быть использовано при лабораторных исследованиях теплофизических свойств различных твердых материалов. Целью изобретения является упрощение проведения эксперимента. Способ заключается в измерении температуры во времени в нескольких точках образца в режиме непрерывного разогрева или охлаждения его с произвольной скоростью до достижения заданной температуры и вычислении по полученным данным измерения температуры во времени методом дискретного совмещения искомой теплофизической характеристики.

Определение удельной теплоемкости вещества. Кабардин О.Ф., Шеффер Н.И. Физ. в шк. 1990. № 5. С. 53-54. [РЖФиз. 1991-2.А160].

Рассмотрен метод определения удельной теплоемкости вещества без использования сведений о теплоемкости калориметра. Метод основан на нагревании твердого тела при его деформации вследствие удара.

Измерение коэффициентов теплового расширения при помощи датчиков напряжений. Measurement of thermal expansion coefficients using a strain gauge. Fox John N. *Amer. J. Phys.*-1990-58, №9. – С. 875-877.[РЖ 1991 7А162].

Предлагаемая установка позволяет непрерывное снятие зависимости удлинения образца от температуры с обработкой всех экспериментальных данных на компьютере. Вместо широко применяемого в аналогичных экспериментах емкостного дилатометра применен более дешевый и более надежный датчик на-

пряжений, сопряженный с мостиком Уитстона, сигнал которого через интерфейс подается на ЭВМ. Дополнительная цепь, содержащая термистор, позволяет минимизировать паразитные эффекты, возникающие вследствие нагревания проводов. Приводится блок-схема предлагаемой установки и типичные результаты измерений для нескольких образцов.

Опыты по механике с использованием термического расширения. Pruebas mecanicas con una maquina de expansion termica. Orozco E., Morales A., Mendoza A. Rev. mex. fis. **1991**. 37, № 4. С. 671-677. [РЖФиз. 1992-6A77].

Изучаются деформации и механические свойства хрупких материалов. Представлены результаты серии экспериментов, связанных с деформацией хрупких материалов монокристаллов $KCl;Ba^{2+}$, поликристаллов S, Ba_2Cu_2 , твердых тел со сложной химической структурой (почечные камни), твердых тел с аморфной структурой (гели окиси кремния) и высокотемпературных полупроводников. Образец помещался между стальным брусом, нагреваемым индукционными токами, и опорой. Установка позволяла измерять малые смещения одного из концов образца вплоть до 10^{-6} м (при длине бруса, равной 1 м). Нагрузка менялась от нескольких миллиграммов до 500 кг. [РЖФиз. 1992-6A77].

Термодинамическое исследование резиновой ленты. A general physics laboratory investigation of the thermodynamics of a rubber band. Savarino G., Fisch M. R. Amer. J. Phys. **1991**. 59, № 2. С. 141-145. [РЖФиз. 1992-8A132].

Описан лабораторный эксперимент по измерению термодинамических свойств резиновой ленты. В первой части работы лента нагружена при постоянной температуре, во второй части обеспечивается постоянство длины ленты при изменении температуры. Два коэффициента в уравнении состояния ленты определяются четырьмя различными способами: численным дифференцированием, численным интегрированием, регрессионным анализом и с помощью линейной регрессии. Обсуждаются достоинства и недостатки каждого из способов. Значения коэффициентов, найденных различными способами, варьируются в пределах 15 % от среднего значения. Цель работы – познакомить студентов с различными методами измерения уравнения состояния реального вещества с помощью несложной аппаратуры, научить методам анализа и обработки данных, а также привить навык работы с экспериментальной аппаратурой.

Лабораторная работа по определению теплоемкости твердых тел в дебаевском приближении. Каменецкая М.С., Петрова Е.Б. Преподавание физики в высшей школе. **1994**. №1. 58-63, 104. [РЖ 1997 4A83.]

Описывается лабораторная установка для определения при постоянном давлении зависимости теплоемкости твердых тел (кремний, свинец, графит) от температуры в области 77-300 К.

Лабораторная работа по определению теплоемкости твердых тел в дебаевском приближении. Каменецкая М.С. Петрова Е.Б. Ред. ж. Изв. вузов. Физ. Томск, **1994**. 10 с. Деп. В ВИНТИ 1.2.94., № 272-B94. [РЖФиз. 1994-5A66.ДЕП.]

Приводится описание новой лабораторной работы для студенческого физического практикума, посвященной исследованию зависимости теплоемкости

твёрдых тел с $\theta_D \geq T_{\text{комн.}}$ от температуры в диапазоне 77К- $T_{\text{комн.}}$, соответствующее квантовому приближению. Величина теплоемкости твёрдого тела определяется по измерению массы испарившегося жидкого азота при охлаждении образца, помещенного в него. Предложенный способ дает хорошие численные результаты и позволяет сравнить экспериментальную кривую с соответствующими участками теоретической функции Дебая.

Прибор для определения коэффициента линейного расширения. Атаманченко А.К. Учеб. физ. **1998.** № 2. 27-28, 78. [РЖ 1999 08A94].

Прибор может быть использован в учебных заведениях для определения коэффициента линейного расширения твёрдых тел. Благодаря новому техническому решению прибор отличается от прототипа, выпущенного Главучтехпромом, малыми размерами, не нуждается в большом количестве дополнительного оборудования, безопасен в эксплуатации, отнимает мало времени на подготовку и проведение эксперимента. Помимо основного назначения прибор может быть использован при решении ряда творческих задач: для исследования линейного расширения твёрдого тела, как индикатор изменения температуры, как датчик в автоматических устройствах.

Прибор для определения коэффициента линейного расширения твёрдых тел. Атаманченко А.К. Пробл. учеб. физ. эксперим. **1998.** № 4 26-27. [РЖ 1999 1A133].

Разработанный прибор состоит из корпуса, индикатора, образца, толкателя, нагревателя. Коэффициент теплового расширения образца больше, чем толкателя, поэтому при изменении их температуры размеры образца и толкателя изменяются в разной степени, что регистрируется индикатором. Описана методика использования прибора для определения коэффициента теплового расширения твёрдых тел.

Импульсный метод определения теплоемкости пластины в лабораторном практикуме по физике. Авотин С.С., Ганшина А.В., Авотина Е.С. Учеб. физ. **2001.** №6, 47-49б64. [РЖ 03.11-18A.159].

Предлагается метод импульсного нагрева для определения теплоемкости металла в учебном лабораторном практикуме по физике. Для проведения эксперимента используется стандартная вакуумметрическая лампа-преобразователь, манометрический термодатчик типа ПМТ-2 с платиновым проволочным подогревателем. Лабораторная установка экономична, проста в изготовлении и обладает достаточной точностью.

Отражение представлений современной физики в лабораторном практикуме (лаб. работа "Эффект памяти формы в монокристалле сплава медь-алюминий-никель"). Агапова Е.М., Арсентьев И.Н., Безрядин Н.Н. и др. "Физическое образование в ВУЗах". **2002.** Т. 8, № 3, с. 33-41.

Метод тепловой релаксации для измерения удельной теплоёмкости твёрдых тел при комнатной температуре в лабораторных работах студентов. A temperature relaxation method for the measurement of the specific heat of sol-

ids at room temperature in student laboratories. Marin E., Delgado-Vasallo O., Valiente H. *Amer. J. Phys.* **2003.** 71, № 10. 1032-1036. [05.08-18A.117].

Недорогой метод измерения теплоёмкости алюминия. A low-cost method for measuring the specific heat of aluminium. Pereira da Silva Wilton, Pecker Jurgen W., e Silva Diego D. P. S., e Silva Cleiton D. P. S. *Phys. Educ.* **2004.** 39, № 6. 514-517. [РЖ 06.07-18A.140].

Определение отношения коэффициентов теплопроводности и электропроводности методом Кольрауша. В.С. Булыгин. МФТИ. Физ. образ. в вузах. **2004.** Т. 10. № 4. С. 75-80.

Получено выражение, позволяющее определять отношение постоянной Больцмана k и элементарного заряда e в эксперименте по стационарному нагреву проволоки постоянным электрическим током.

Определение отношения коэффициентов теплопроводности и электропроводности металлов. В.С. Булыгин. Физ. образ. в вузах. Т. 12, № 4. **2006.** 58-62.

Кольрауш в своих работах продемонстрировал, что для экспериментального определения отношения коэффициента теплопроводности и проводимости можно использовать измерения установившегося распределения температуры в проволоке, нагреваемой постоянным электрическим током, при условии, что боковая поверхность проволоки теплоизолирована, а концы имеют одинаковую температуру. Выведена формула

$$\lambda(T) = -u(x) \frac{dU}{dT} \Big|_{x=x(T)} = -u(x) \frac{(du/dx)}{(dT/dx)} \Big|_{x=x(T)},$$

где $x(T)$ – функция, обратная распределению температуры вдоль проволоки $T(x)$. Таким образом, если еще измерить распределение электрического напряжения $u(x)$, отсчитываемого от середины проволоки, то это выражение позволяет по результатам этих измерений определить температурную зависимость $\lambda(T) = k(T)/\sigma(T)$ отношения коэффициентов теплопроводности k и электропроводности σ металла, из которого изготовлена проволока.

Учебно-лабораторная работа по определению теплоёмкости кристаллических тел. Бочегов В.И. *Проблемы учебного физического эксперимента. Материалы 10 Всероссийской научно-практической конференции “Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения.”* Москва. **2005:** Сборник научных трудов. Москва 2005. 64-66. [РЖ 06.11-18A.132].

Изложен принцип работы калориметра на основе анизотропных тепло-электрических тепломеров. Дана краткая методика измерения теплоёмкости объектов с помощью такого калориметра. Предложена примерная схема выполнения учебной лабораторной работы.

Определение удельной теплоемкости металлов. Фрейберг Г.Н. *Физическое образование в вузах.* **2006.** 12, № 4. 76-78, 121. [РЖ 07.08-18A.130].

Рассмотрена возможность использования цилиндрических образцов при определении теплоемкости металлов с помощью калориметра. Описана экспериментальная установка, включая устройство калориметра, методика проведения измерений и способ обработки экспериментальных данных. Применение образцов цилиндрической формы по сравнению с образцами конической формы, описанной ранее, имеет следующие достоинства: 1) при большей величине отношения длины цилиндра к его диаметру процент теплопередачи может быть легко описан теоретически; 2) однородность тепловых потоков и одинаковость температуры по всему объёму образца; 3) изготовить цилиндрический образец с требуемой точностью существенно проще, чем конический. Изложены основные требования, которое необходимо соблюдать при конструировании калориметра и работе с ним в экспериментах по определению теплоемкости. Экспериментальные результаты показали возможность использования предлагаемой установки для определения теплоемкости металлов в физическом практикуме и научных исследованиях.

“Исследование теплоемкости твердых тел” в лабораторном практикуме для студентов технических вузов. Бункин А.Ю., Повзнер А.А., Борисова Е.А. *Школа и вуз: достижения и проблемы непрерывного физического образования: Сборник научных трудов 4 Российской научно-методической конференции учителей школ и преподавателей вузов.* Екатеринбург, **2006**. Екатеринбург. 2006.139-143. [РЖ 07.10-18А.133].

Теоретическая часть работы содержит общие сведения о теплоемкости твердых тел. Обсуждается классическая теория теплоемкости, закон Дюлонга и Пти, а также теория теплоемкости Дебая. Экспериментальная часть включает описание лабораторной установки, конкретных задач, методик измерений и обработки результатов. Предложенная лабораторная работа позволяет определить теплоемкости нагревательной установки, мощности тепловых потерь нагревателя и теплоемкости металлических образцов. Приводится методика расчета удельной и молярной теплоемкости металлов. Проверяется справедливость закона Дюлонга и Пти.

Температурное расширение твердых тел. Смирнова Т.П., Евдокимова Л.А. *Физика в системе современного образования. (ФССО-07): Материалы 9 Международной конференции.* Санкт-Петербург, 4-8 июня, 2007. Т.1. Спб., **2007**. 135-138. [РЖ 08.05-18А.140].

Температурное расширение кристаллических тел есть макроскопическое проявление расширения кристаллической решетки. Используются методы гармонических и ангармонических колебаний для объяснения температурного расширения твердых тел. Приведено статистическое рассмотрение теплового расширения на модели одномерной линейной цепочки атомов. Данная лабораторная работа дает возможность на I-II курсах физических и естественно-научных специальностях вузов обсуждать теоретические модели сил межатомного взаимодействия.

Исследование кинетики и механизма мартенситных превращений в сплавах с эффектом памяти формы. Рудин А.В., Першенков П.П. *ФССО-07. Материалы IX Межд. конф.* С.-Петербург. **2007**. Т. 1. С. 112-114.

Феноменология эффекта памяти заключается в следующем. Материал в виде ленты, проволоки и т. п., обладающий эффектом механической памяти формы (ЭМПФ), пластически деформируют при температуре выше температуры прямого мартенситного превращения с целью придания ему определенной формы. Затем охлаждают до температур, обеспечивающих протекание (полного или частичного) мартенситного превращения и деформируют в этой температурной области до получения заданной формы. При нагреве выше температуры обратного мартенситного превращения образец вновь восстанавливает исходную форму. В ходе эксперимента образец последовательно нагревается и охлаждается, при этом измеряется время процесса, температура образца и величина деформации образца. По полученным экспериментальным данным строится график зависимости величины деформации (прогиба) в режиме нагревания и охлаждения при постоянной нагрузке. По графику определяется температура начала и конца мартенситных превращений и рассчитывается коэффициент полезного действия для обратного мартенситного превращения исследуемого сплава. Экспериментальная установка может быть успешно использована в университетских лабораториях физики твердого тела в качестве лабораторного оборудования при выполнении индивидуальных и фронтальных лабораторных работ – для исследования фазовых переходов в чистых металлах и металлических сплавах.

2.3. Нагрев и охлаждение жидкостей

Определение коэффициента расширения ртути методом сообщающихся сосудов. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Том второй. Молекулярные и тепловые явления. Электричество и магнетизм. Оптика и строение атома. К.П. Яковлев. Работа 29. М.-Л. 1949. С. 74.

Равновесие жидкостей в сообщающихся сосудах возможно, как известно, только в том случае, если столбы жидкости оказываются гидростатически эквивалентными. Отсюда следует, что в сообщающихся сосудах при равновесии высоты столбов жидкости должны быть обратно пропорциональны плотностям жидкостей. То же явление должно наблюдаться и в том случае, если в сообщающихся сосудах находится одна и та же жидкость при разных температурах в том и другом колене. Коэффициент расширения ртути находится по формуле

$$\beta = \frac{H_t - H_0}{H_0 t},$$

где H_0 и H_t – высота жидких столбов при соответствующих температурах 0°C и $t^\circ\text{C}$.

Определение удельной теплоемкости жидкостей при помощи электрокалориметра. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Том второй. Молекулярные и тепловые явления. Электричество и магнетизм. Оптика и строение атома. К.П. Яковлев. Работа 33 в. М.-Л. 1949. С. 104.

Этот метод основан на определении того нагревания, которому подвергаются две жидкости, налитые в одинаковые калориметры, под действием одного

и того же электрического тока. Удельная теплоемкость c_1 исследуемой жидкости определяется по формуле

$$c_1 = \frac{1}{m_1} \left[(c_2 m_2 + W_2) \frac{t_2 - t_0''}{t_1 - t_0'} - W_1 \right],$$

где c_2 – известная удельная теплоемкость другой жидкости, налитой во второй калориметр, m_1 и m_2 – массы этих жидкостей, W_1 и W_2 – водяные эквиваленты сосудов первого и второго калориметров, t_0' и t_1 – начальная и конечная температуры первой жидкости, а t_0'' и t_2 – те же величины для второй жидкости.

Определение удельной теплоемкости жидкости с помощью электрокалориметра. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Составлено: А.Г. Белянкиным, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. М.-Л. 1951. Задача 21. С. 127-128. 1953, 1955. Задача 21. С. 129-130.

Используемый прибор состоит из двух одинаковых калориметров, наполненных различными жидкостями, в которые погружены спиральные проволоки большого электрического сопротивления. Сопротивления проволок подбирают одинаковыми, соединяют последовательно, так что при пропускании через них электрического тока они выделяют одинаковое количество тепла. Удельная теплоемкость c исследуемой жидкости вычисляется по формуле

$$c = \frac{1}{m} \left[(c_1 m_1 + w_1) \frac{\tau_1 - t_1}{\tau - t} - w \right],$$

где m – масса исследуемой жидкости, помещаемой в первый калориметр, m_1 и c_1 – соответственно масса и удельная теплоемкость эталонной жидкости, t и τ – соответственно начальная и конечная температуры первого калориметра, t_1 и τ_1 – соответственно начальная и конечная температуры второго калориметра, c_1 – удельная теплоемкость второго калориметра, w и w_1 – соответственно водяной эквивалент сосуда, мешалки и термометра первого и второго калориметров.

Определение коэффициента объемного расширения керосина по способу сообщающихся сосудов. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, 1959. Работа 30. С. 101-104.

Определение водного эквивалента вакуумного калориметра ледяным методом. Dunicz Boleslaw Kudwik Water equivalent of vacuum flask calorimeter by the ice fusion method. "J. Chem. Educ." 1960. 37, № 12, 635-636. [РЖФиз. 1961 8А69].

Под водным эквивалентом калориметра понимают теплоемкость калориметра и всех его принадлежностей, выраженную в теплоемкости соответствующей массы воды. Описывается метод определения водного эквивалента вакуумного калориметра, состоящего из сосуда Дьюара, закрытого пробкой, мешалки, обычного термометра и дифференциального термометра Бекмана. В калориметр, содержащий массу воды m при температуре t_i , вводят некоторую массу льда w

при температуре 0°C . Вследствие таяния льда температура воды уменьшается до величины t_e . Водный эквивалент калориметра X может быть рассчитан по уравнению теплового баланса $X = w(l + ct_e)/c\Delta t - m$, где c – удельная теплоемкость воды в *кал/г·град*, l – теплота плавления льда.

Измерение коэффициента теплового расширения жидкости посредством ареометра. Ainslie D.S. Measurement of the coefficient of expansion of a liquid by means of a hydrometer. “Phys. Teacher”, 1964, 2, № 7, 338. [РЖФиз. 1965 6A44].

Нагретое до 140°C масло выливают в цилиндрический сосуд и опускают в него ареометр. Температуру масла измеряют обычным термометром. Находят зависимость плотности масла от температуры, а из этой зависимости – коэффициент объемного расширения масла. Для этого опыта необходим ареометр с пределами измерений $0,800$ – $0,900$ и делениями через $0,001$.

Определение удельной теплоемкости жидкости. Цеков Хр. Един метод за определяне специфичната теплоемкост на течности. “Матем. и физика” (Бълг.), 1965, 8, № 1, 60. [РЖФиз. 1965 8A61].

Колбу с жидкостью (напр., со спиртом) плотно закрывают и через пробку пропускают стеклянную трубку длиной 30 см и диаметром $0,4\text{ см}$. На трубку наносят 2 метки на расстоянии 20 см одна от другой. Колбу погружают в водяную баню, при этом спирт расширяется и поднимается до верхней метки. Затем колбу опускают в калориметр, наполненный водой. Массу калориметра m_k , массу воды m_e и температуру воды t_0 в калориметре предварительно измеряют. Когда жидкость в трубке опустится до нижнего уровня, измеряют температуру воды в калориметре t_1 . Затем колбу снова нагревают так, чтобы спирт поднялся до верхней метки, и опускают в калориметр, наполненный исследуемой жидкостью, масса которой равна m_T и температура t_2 , и измеряют температуру жидкости t_3 , когда спирт вновь опустится до нижней метки. Так как количество тепла, отданное спиртом, в обоих случаях одинаково, можно записать уравнение теплового баланса и рассчитать удельную теплоемкость жидкости по формуле

$$C_T = [m_e(t_1 - t_0) + c_k m_k(t_1 + t_2 - t_0 - t_3)]/m_T(t_3 - t_2).$$

Определение теплового эквивалента. Houben Hermann. Zur Bestimmung des Warmaequivalents. “Prax. Naturwiss.”, 1966, A15, № 7, Physik, 188-190. [РЖФиз. 1967 2A61].

Описывается электрокалориметрический метод определения теплового эквивалента при помощи проточного калориметра. В калориметрическую трубку помещают стеклянную трубку, обвитую проволокой, которая служит нагревателем. Через стеклянную трубку протекает вода. Нагреватель соединяют с источником напряжения, при этом тепло, выделяющееся при прохождении тока, идет на нагревание воды. Разность температур на входе и на выходе калориметра $\theta_2 - \theta_1$ измеряют термометрами. Тепловой эквивалент рассчитывают по формуле $k = cm(\theta_2 - \theta_1)/IUt$, где U – напряжение, I – ток, t – время, в течение которого через калориметр проходит масса m воды. Приведены методические указания и результаты измерений.

Определение удельной теплоемкости жидкостей. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В.И. Ивероновой. 1967. Задача 39. С.198-203.

Основной прибор установки – калориметр, представляющий собой металлический стакан, внутри которого находится нагреватель. Сам калориметр установлен в термостат. Температура в калориметре измеряется с помощью термодатчика. В ходе выполнения работы нагрев калориметра включают и выключают в определенной последовательности, снимая при этом зависимость его температуры от времени. Обработка этой зависимости, представленной графически, и позволяет получить значение удельной теплоемкости исследуемой жидкости.

Опыты с использованием холестероловых жидких кристаллов. Ferguson James L. Experiments with cholesteric liquid crystals. “Amer. J. Phys.”, 1970, 38, № 4, 425-428. [РЖ 1970 9A83].

Описана серия экспериментов по исследованию термодинамических характеристик тепловых процессов с использованием в качестве визуально изменяющегося детектора холестероловых пленок различного состава (хлориды, бензоаты и др.). Подробно излагается методика проведения опытов по изучению распределения температур, теплопроводности, распространению тепловой радиации, теплового расширения тел и т. п. Изменение окраски холестероловых пленок различного состава позволяет фиксировать изменение температуры в описанных опытах с точностью до 0,010 С, получать наглядное изображение температурных распределений.

Постановка лабораторной работы “Определение удельной теплоемкости жидкости” Соломонов И. Как провести лабораторную работу “Определение удельной теплоемкости жидкости”. “Мат. и физика” (НРБ). 1972, 15, № 2, 32-33. [РЖ 1972 10A110].

Определение удельной теплоемкости жидкости. Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Под ред. А.П. Максименко. Днепропетровский. гос. ун-т. 1973. Работа № 1-11. С. 78-82.

Устройство для измерения давления насыщенных паров жидкостей. Захаров И.В., Рачек В.Ф.; Моск. физ.-техн. ин-т. А. с. 1026024, СССР. Заявл. 23.12.81, №3369785118-10, опублик. в Б.И., 1983, № 24, МКУ G 01 L 7118. [РЖ 1984 №7. A101.]

Содержит резервуар с жидкостью, манометр сравнения, термостат, вакуумирующую и измерительную системы. Манометр сравнения выполнен в виде погруженной в жидкость вертикальной трубки с закрытым верхним концом в форме капилляра, термостат выполнен в виде термостатирующей оболочки, охватывающей верхнюю часть трубки, а резервуар выполнен съемным и сообщенным с вакуумирующей и измерительной системами. Изобретение может использоваться в качестве учебного прибора при изучении курса молекулярной физики.

Определение теплоемкости спирта. П. С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988. Лаб. работа 2.1. С. 39-42. 1999. Лаб. работа 2.1. С. 39-42.

Исследуемое вещество – спирт – помещается в т. н. диатермический калориметр, в котором тепло, сообщаемое капсуле со спиртом, идет на нагрев капсулы, исследуемого вещества и на теплообмен с оболочкой. Эксперимент включает в себя три этапа: охлаждение (после предварительного небольшого нагрева), нагрев и опять охлаждение. На каждом этапе измеряется температура капсулы с течением времени.

Предварительно определяется теплоемкость калориметра H , для чего капсулу наполняют веществом, имеющим известную теплоемкость – водой. Затем в капсулу наливают спирт и повторяют процесс “охлаждение–нагрев–охлаждение”. Теплоемкость спирта находится по формуле

$$c = \frac{Q}{m(\Delta T + \theta)} - \frac{H}{m},$$

где m – масса исследуемого вещества, Q – количество тепла, сообщенного капсуле со спиртом, $\Delta T = T_2 - T_1$, где T_1 и T_2 – начальная и конечная температуры линейного участка зависимости температуры капсулы с веществом при ее нагреве, θ – температурная поправка, связанная с теплообменом капсулы и оболочки, определяемая путем обработки результатов измерения температуры капсулы с веществом в функции времени на этапах ее охлаждения, H – теплоемкость калориметра, находимая по результатам опыта с водой.

Установка для определения теплоемкости жидкости. Попов С.Е., Колесников Н.И. Учеб. физ. **2002.** №2. 8-10, 63. [РЖ 03.10-18А.156].

Описана простая многофункциональная установка, которую можно использовать в лабораторных практикумах высшей и средней школы. Установка состоит из двух калориметров, включенных в общую электрическую цепь. Приведены результаты измерения теплоемкости жидкости методом сравнения с известной теплоемкостью другой жидкости.

Компьютеризированная лабораторная работа по физике “Прецизионное измерение тепловой энергии проточным калориметром.” В.В. Ларионов, Г.В. Гаранин, И. П. Чернов. Физ. образ. в вузах. **2004.** Т. 10. № 1. С. 103-107.

Компьютеризированная лабораторная работа позволяет осуществлять прецизионное измерение тепловыделения при процессах, протекающих в проточном калориметре. Использована схема калибровки при помощи джоулева нагревателя. Она позволяет студентам знакомиться с измерительными технологиями с применением компьютеров и дает возможность моделировать управляющие компьютерные устройства.

Определение удельной теплоемкости жидкости методом наблюдения скорости охлаждения. Красникова М.Д., Красников А.С., Учеб. физ. **2004.** № 4. 29-31. [РЖ 05.08-18А.116].

Предложена работа по определению удельной теплоёмкости жидкости методом наблюдения скорости охлаждения исследуемой и эталонной жидкостей. Приведены расчётные формулы, дано описание прибора для получения экспериментальных данных.

Лабораторная модель для изучения неустойчивости Рэля-Тейлора. Мешков Е. Е., Савицкий Д. О. *Вестник Саровского Физтеха*. 2008. № 15. 146-149. [РЖ 09.11-18А.98].

Описывается простая и безопасная лабораторная методика, которая может быть использована для изучения процессов развития неустойчивости Рэля-Тейлора в лабораторных работах в учебном процессе СарФТИ и других вузов. Неустойчивость Рэля-Тейлора (НРТ) — это неустойчивость тяжелой жидкости, налитой поверх легкой. Она имеет простой физический смысл — тяжелая жидкость тонет в легкой, а легкая всплывает в тяжелой. В технических приложениях — это неустойчивость границы жидкостей разной плотности. Граница движется с ускорением, направленным от легкой жидкости к тяжелой. Интерес к этой неустойчивости связан с тем, что она играет важную роль в инерционном термоядерном синтезе и астрофизике.

2.4. Определение механического эквивалента теплоты

Определение механического эквивалента теплоты. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. С. 135. 1937, 1938. Задача 19. С. 164.

Основной элемент прибора – латунный калориметр, в котором есть система лопаток, приводимых во вращение с помощью электромотора. Число оборотов лопаток отсчитывается по показаниям счетчика. Внутри калориметра наливают определенное количество воды, для измерения ее температуры служит точный калориметрический термометр. Калориметр через блок шнурком соединен с грузом, который создает определенный вращающий момент, действующий на калориметр. При приведении воды в калориметре во вращение с помощью лопаток он начинает поворачиваться, и при некотором угле отклонения моменты обеих сил – давления воды на лопатки и действия силы груза – оказываются по абсолютной величине равными. При этом вся работа, производимая лопатками внутри калориметра, полностью превращается в теплоту. Механический эквивалент теплоты вычисляется по формуле

$$J = \frac{A}{Q} = \frac{2\pi N R F}{(P + w)\Delta t},$$

где A – работа при вращательном движении, Q – количество теплоты выделенной в калориметре, N – число оборотов системы лопаток, F – вес груза на конце шнура, R – плечо этой силы, равное радиусу шкива, через который он перекинут, P – вес воды в калориметре, w – водяной эквивалент калориметра, Δt – изменение температуры воды в калориметре через n оборотов лопаток.

Определение механического эквивалента теплоты калориметрическим методом. К. П. Яковлев. Физический практикум. 1949. Работа 21а. С. 12-14.

Определение механического эквивалента теплоты при помощи ртутного калориметра. К.П. Яковлев. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Том второй. Молекулярные тепловые явления. Электричество и магнетизм. Оптика и строение атома. М.-Л. 1949. Работа 21б. С. 14-16.

Калориметрический прибор состоит из двух стальных полых конусов, внешнего и внутреннего, которые расположены вертикально и обращены своими вершинами вниз. Во внутренний конус наливают ртуть; вес конуса и вес налитой в него ртути должны быть известны. Внешний конус можно приводить в быстрое вращение при помощи небольшого мотора. При вращении внешнего конуса, вследствие трения поверхностей обоих конусов, развивается теплота, которая вызывает нагревание обоих конусов и ртути. Механический эквивалент теплоты вычисляется по формуле

$$j = \frac{2\pi n l m g}{[c_1(m_1 + m_2) + c_2 m_3](t_1 - t_0)},$$

где n – общее число оборотов за данный промежуток времени; l – расстояние от оси вращения конуса до точки прикрепления нити, к которой подвешен груз, противодействующий вращению конуса; m – масса груза; g – ускорение свободного падения; c_1 и c_2 – удельные теплоемкости стали и ртути соответственно; m_1 , m_2 и m_3 – массы внешнего и внутреннего конусов и масса ртути в калориметре соответственно; t_0 и t_1 – температура калориметра в начале и в конце опыта.

Определение механического эквивалента теплоты по нагреванию жидкости током. К.П. Яковлев. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Том второй. Молекулярные и тепловые явления. Электричество и магнетизм. Оптика и строение атома. М.-Л. 1949. Работа 21с. С. 17-19.

Электрокалориметр представляет собой обыкновенный водяной калориметр с термометром, мешалкой и электрическим нагревателем. Механический эквивалент теплоты вычисляется по формуле

$$J = \frac{IUt}{(M + W)(t_1 - t_0)},$$

где I – сила тока в цепи, U – разность потенциалов на клеммах нагревателя, t – время, в течение которого ток проходит через калориметр, M – масса воды в калориметре, W – водяной эквивалент калориметра, $t_1 - t_2$ – повышение температуры воды под действием тока.

Определение механического эквивалента теплоты. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред проф. В.И. Ивероновой. Составлено: А.Г. Белянкиным, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. М.-Л. 1951. Задача 25. С 139-142. 1953, 1955. Задача 25. С. 141-144. 1962. Задача 26. С. 145-148. 1967. Задача 36. С.190-193.

Механический эквивалент теплоты определяется по методу Джоуля. Прибор состоит из латунного никелированного калориметра, который располагается в обернутой войлоком оболочке. Эта оболочка наполняется водой комнатной температуры и служит для защиты от случайных колебаний температуры. В калориметр вставлена латунная трубка с лопатками. На конец этой трубки насажен шкив, соединенный с мотором ленточным ремнем. Обороты шкива при включении мотора отмечает счетчик. Скорость вращения мотора регулируется реостатом. Лопатки, вращаясь, приводят во вращение жидкость. Механическая работа

при этом благодаря вязкости жидкости переходит в теплоту и температура жидкости повышается. Механический эквивалент теплоты вычисляется по формуле

$$j = \frac{2\pi N R F}{(P + w)\Delta t},$$

где N число оборотов лопаток, фиксируемое с помощью специального счетчика, R – радиус шкива, на который намотана нить с грузом, F – вес груза, P – вес воды в калориметре, w – водяной эквивалент калориметра, Δt – повышение температуры калориметра.

Прибор для определения механического эквивалента теплоты. McLeod John. Webrouck Albert E. Mechanical equivalent of heat apparatus. “*Amer. J. Phys.*” **1960**, 28, № 9, 793-796. [РЖФиз. 1961 8A68].

Для определения механического эквивалента теплоты предлагается прибор, состоящий из двух турбинок, помещенных в калориметр. Одна турбина вращается внутри другой при помощи электромотора, другая неподвижна. Через калориметр протекает вода. Температура воды, входящей в калориметр, и температура воды, выходящей из него, измеряются двумя термометрами через несколько минут после начала вращения турбинки. Из отношения механической мощности вращения к количеству тепла, выделенному в калориметре в единицу времени, может быть определен механический эквивалент теплоты. Результаты, полученные учащимися в лаборатории (скорость вращения 1830 об/мин; количество воды, протекающей через калориметр, 400 см³/мин; разность температур 8°), отличаются от принятой величины на 2 %.

Определение механического эквивалента теплоты по способу Джоуля. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть I. Вердеревская. Н.Н., Иродов И.Е., Майкова В.И. и др. Под ред. проф. И.В. Савельева. Москва,

Определение механического эквивалента теплоты по способу Джоуля. Работа 14. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть 1. Составлено: Н.Н. Вердеревской, И.Е. Иродовым, В.И. айковой и др. Под ред. проф. И.В. Савельева. **1960**. С. 114. МИФИ. Кафедра общей физики. **1961**. Работа 14. С. 117-122.

Определение механического эквивалента тепла методом Микулеску (100 лет со дня рождения румынского физика К. Микулеску). Georgescu L. Determinarea echivalentului mecanic al caloriciei. Prin metoda Miculescu. (100 de ani de la nasterea fizicianului roman C. Miculescu) “*Rev. fiz. sichim*”, **1964**, A1, № 2, 73-78. [РЖФиз. 1965 2A72].

К 100-летию со дня рождения К Микулеску (1864–937 г.г.) в Бухарестском университете в качестве лабораторной работы воспроизведена с небольшими изменениями установка, описанная в его диссертации (Определение механического эквивалента тепла. 1981). Электродвигатель 0,25 кВт, 1420 об/мин. Установлен на горизонтальной планке. Последняя с помощью двух укрепленных по ее концам вертикальных планок подвешена на двух опорах так, что может качаться. С одной из вертикальных планок у опоры жестко связан рычаг, перпен-

дикулярный как к этой, так и к горизонтальной планке. Для повышения чувствительности система сбалансирована грузом, расположенным выше опор. Электродвигатель, вращая пластину в калориметре, наполненном водой, заставляет воду нагреваться. Вода непрерывно подается и отводится из калориметра с такой скоростью, чтобы измеряемые термомпарами температуры воды на его входе t_1 и выходе t_2 были постоянны. Количество тепла, выделяемого в единицу времени, равно $MC(t_2 - t_1)$, где M – расход воды, а C – ее теплоемкость. Сопротивление воды создает приложенный к электродвигателю момент, стремящийся повернуть подвешенную систему. Его уравнивают с помощью груза, передвигаемого по рычагу. Из равенства моментов определяют силу противодействия, приложенную к электродвигателю, и по ней и по числу оборотов находят механическую работу, производимую в единицу времени. Полученные таким образом данные позволяют весьма точно вычислить эквивалент, так как работа и количество тепла измеряются нулевым методом. Микулеску получил величину эквивалента $J=4,1857$ Дж/кал. По определению Международного комитета мер и весов в 1950 г. $J=4,1855$ Дж/кал. Приведено описание установки и указан порядок работы с ней.

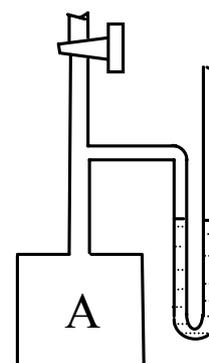
В защиту лабораторной работы “Изучение закона Джоуля–Ленца.” Длужневский Г.И. “Изв. высш. учебн. заведений. Физика.” 1966, № 6, 153-154. [РЖФиз. 1967 8А49].

Отмечается, что в связи с введением Международной системы единиц отпадают понятия теплового и механического эквивалентов, поскольку теплота измеряется в джоулях. Поэтому опыты Джоуля и Джоуля–Ленца в их прежнем содержании не имеют смысла. Учитывая историческую и методологическую ценность опытов Джоуля–Ленца, целесообразно сохранить их в практикуме, изменив их содержание и метод оценки погрешности. Содержание работы “Изучение закона Джоуля–Ленца” должно состоять не в определении коэффициента 0,24 кал./ Дж, а должно быть сведено к закону сохранения энергии. В этом варианте студенты убеждаются в равенстве (в пределах погрешности) электрической и молекулярно-кинетической (тепловой) энергии.

Определение механического эквивалента тепла (метод расширения газа). Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В.И. Ивероновой. 1967. Задача 37. С.193-195.

Работу расширения в данной установке совершает воздух, заключенный в рабочем объеме A . Этот объем соединен капилляром с U-образной трубкой.

В этой трубке находится вода, играющая роль поршня. Рабочий объем погружен в термостат с водой. U-образная трубка остается вне термостата. При нагревании воздуха в объеме A он расширяется. Уровень воды в U-образной трубке перемещается. При этом совершается работа против внешнего давления. Механический эквивалент тепла вычисляется по формуле



$$j = \frac{i-2}{2} \frac{1}{c_p} \frac{A}{\Delta T} \frac{1}{m},$$

где i – число степеней свободы молекулы, c_p – удельная теплоемкость газа (воздуха) при постоянном давлении, m – масса газа, ΔT – изменение температуры газа, $A=p \cdot \Delta V$ – работа, совершенная газом, p – давление газа, при котором он расширяется (практически атмосферное), $\Delta V=S \cdot \Delta h$ – изменение объема воздуха, S – площадь сечения U – образной трубки, Δh – изменение высоты уровня воды в этой трубке.

Устройство для измерения механического эквивалента теплоты. Malaguti F., Verondini E. Dispositivo per misure didattiche dell'equivalente meccanico della calore. "G. Fis. Soc. Ital. fis.", **1972**, 13, № 2, 83-91. [РЖ 1973 2A61].

Описывается метод измерения механического эквивалента теплоты, представляющий собой модификацию метода Микулеску (вода нагревается за счет трения, производимого лопаточками, приводимыми в движение мотором), также метода Вьоле и д'Арсонваля (проводник нагревается за счет токов Фуко, возникающих при вращении проводника в магнитном поле).

Непосредственное определение механического эквивалента теплоты из опыта с падением тела. Letterer Rudolf. Direkte Bestimmung des mechanischen Wärmeaquivalents aus einem Fallversuch. "Prax. Naturwiss.", **1972**, Teil I, 21, № 5, 117-119. [РЖ 1972 10A110].

Предлагаемая лабораторная работа по определению механического эквивалента теплоты состоит в следующем: за счет энергии тела, падающего с высоты h , происходит нагревание пластилина, что приводит к нагреванию находящегося в пластилине резистора, величина сопротивления которого сильно зависит от температуры. По изменению сопротивления резистора (определяется с помощью измерительного моста) определяют изменение температуры пластилина. Зная высоту падения тела, его массу, массу пластилина, его удельную проводимость и изменение температуры, автор определяет механический эквивалент теплоты, отличающийся от табличного примерно на 5 %.

Работа и тепло. Kröncke Helmuf . Arbeit und Wärme. "Prax. Nadurwiss", **1973**, Teil 1, 22, № 4, 92-95. [РЖ 1973 9A62].

Для опытов по измерению механического эквивалента теплоты предлагается использовать прибор , состоящий из металлического цилиндра массой ≈ 150 г, соединенного с термоэлементом, вокруг которого обвит перлоновый шнур длиной 1,5 метра. Груз 10 Н, висящий на шнуре, определяет силу трения между шнуром и цилиндром. Цилиндр вращают заданное число раз и измеряют повышение температуры, вызванные работой против силы трения. Зная теплоемкость металла, вычисляют механический эквивалент теплоты. Для точного измерения

температуры напряжение с термоэлемента подается через усилитель на милливольтметр.

Определение механического эквивалента теплоты с помощью калориметра Каллендера. – Метод наименьших квадратов. Обратная интерполяция. О.Б. Васильев, М.Ф. Вукс, Р.В. Григорьев и др. Физический практикум с применением ЭВМ. Выпуск 2. Ленинград. 1977. Работа № 4.С. 64-65.

2.5. Эффект Джоуля–Томсона

Установка для лабораторной работы по измерению коэффициента Джоуля–Томсона. Wolff C. Appareil de travaux pratiques pour la mesure du coefficient de Joule-Thomson. “Bull. Union phys.”, 1971. 65, № 536, 961-966. [РЖ 1971 12А116].

Отмечается важность постановки эксперимента по адиабатическому расширению газа для иллюстрации основных понятий термодинамики (идеальный газ, внутренняя энергия, энтальпия). В предложенном эксперименте сжатый газ из баллона поступает в теплообменник, откуда при температуре T_1 и давлении P_1 попадает в камеру, разделенную пористой перегородкой на два отсека. В камере происходит адиабатическое расширение газа до давления P_2 . Возникающее изменение температуры регистрируется термопарами, находящимися в отсеках. Вне камеры они включены в потенциометрический мост. Пределы изменения давления 1,5÷6,0 бар, температуры – (20÷80)⁰ С. Точность измерения P – 0.05 бар, температуры T – 0,02° С. Строится график изменения температуры ΔT в зависимости от изменения давления ΔP , по которому определяется значение коэффициента Джоуля-Томсона, $\mu = (\Delta T / \Delta P)_H$ при заданной температуре T_1 . Отмечается, что при $P < 1,5$ бар график отклоняется от прямой. Найденные значения коэффициента для азота и углекислого газа близки к табличным.

Глава 3.

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

3.1. Диффузия

Определение коэффициента диффузии жидкостей оптическим методом. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 24. М.-Л. 1949. С. 38.

Оптический метод определения коэффициентов диффузии основан на измерении отклонения световых лучей, которое они испытывают при прохождении через слой жидкости, оптически неоднородной, т. е. жидкости с различной величиной коэффициента преломления в различных точках. Такие условия имеют место, если параллельный пучок световых лучей падает нормально на боковую сторону плоско-параллельного стеклянного сосуда, в котором происходит диффузия жидкости. Отклонение луча пропорционально толщине слоя жидкости d и градиенту коэффициента преломления. Наибольшее отклонение луча β_{\max} должно иметь место в том слое жидкости, где градиент коэффициента преломления достигает максимума. Для коэффициента диффузии k получена формула

$$k = \frac{d^2 (n_0 - n_1)^2}{4\pi(t_2 - t_1)} \left(\frac{1}{\beta_2^2} - \frac{1}{\beta_1^2} \right),$$

где n_0 и n_1 – коэффициенты преломления чистого растворителя и диффундирующего раствора, β_1 и β_2 – значения β_{\max} для двух моментов времени t_1 и t_2 .

Опыт по диффузии и его количественная интерпретация. Heise Hans. *Über einen Diffusionsversuch und seine quantitative Auswertung. "Prax. Naturwiss."*, 1960, A9, № 6, 151-154. [РЖФиз. 1961, 1A113].

Описываются опыты по диффузии в системах светильный газ-воздух и водород-воздух. При проведении опытов измеряют с помощью ртутного манометра, соединенного с диффузионной камерой, изменение давления в процессе диффузии и строят графики зависимости относительного изменения давления от времени. Принимая во внимание закон Дальтона, а также тот факт, что давление внутри камеры и вне камеры для каждого из двух газов изменяется независимо друг от друга по экспоненциальному закону, рассчитывается отношение молекулярных скоростей диффундирующих газов.

Опыты по диффузии и вытеканию газа. Kern Wilfried. *Diffusions- und Ausstrom-Versuche zur Gaskinetik. "Prax. Naturwiss."*, 1961, A10, № 11, Physik. 293-298. [РЖФиз. 1963 1A108].

Описываются приборы и методика проведения опытов, демонстрирующих изменение давления в диффузионной камере в процессе диффузии и зависимость скорости вытекания газа из узкого отверстия от его молярного веса. См. также РЖФиз., 1961, 1A113.

Новые работы по молекулярной физике. Тодес О.М., Петренко И.И. "Успехи физ. наук", 1962, 76, № 1, 181-183. [РЖФиз. 1961 9A30].

Описываются две лабораторные работы по молекулярной физике.

1. Определение коэффициента диффузии и длины свободного пробега молекул водяного пара в воздухе. Под стеклянным колоколом воздушного насоса помещают стойку с проволокой, на которую подвешивается водяная капля, и стаканчик с серной кислотой для поглощения водяных паров. При помощи микроскопа измеряют диаметр капли через последовательные промежутки времени при трех давлениях: $p_0=1, \frac{1}{2}$ и $\frac{1}{4}$ ат. И рассчитывают коэффициент диффузии по графику зависимости R^2 от времени. Измерения при трех давлениях позволяют проверить зависимость $Dp_0=const$ и по средней скорости молекул рассчитать среднюю длину свободного пробега молекул пара в воздухе.

2. Изучение зависимости вязкости газа (воздуха) от давления и определение длины свободного пробега молекул. Основная часть прибора представляет собой латунную стойку, на которой укреплен ряд параллельных латунных дисков, расположенных горизонтально. Через прорезы в дисках по их центру на упругой нити подвешена вертушка – стержень с системой параллельных дисков. Стойку с вертушкой укрепляют внутри цилиндра вакуумной колбы. С помощью магнита извне вертушку закручивают на угол $\approx 45^\circ$, в результате чего возникают затухающие крутильные колебания. Из решения уравнения движения вертушки получается формула, в которой вязкость воздуха обратно пропорциональна числу колебаний z , происходящему до уменьшения амплитуды на $1/3$. Измерение z и построение графика зависимости $1/z$ от p дает возможность убедиться в зависимости внутреннего трения газа от давления согласно молекулярно-кинетической теории и оценить длину свободного пробега.

Измерение коэффициента самодиффузии в жидкости импульсным методом ЯМР. – Отыскание параметров экспоненциальной зависимости методом наименьших квадратов. О.Б.Васильев, М.Ф. Вукс, Р.В. Григорьев и др. Физический практикум с применением ЭВМ. Выпуск 2. Ленинград. 1977. Работа № 2. С. 52-57.

Исследование взаимной диффузии газов. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Москва. Наука. 1983. Работа 3.5. С. 194-198.

Диффузией называется самопроизвольное перемешивание молекул, происходящее вследствие их теплового движения. Два сосуда с объемами V_1 и V_2 соединены трубкой длины l и сечения S . Сосуды заполнены смесью двух газов при одинаковом давлении, но с различной концентрацией компонентов. Вследствие взаимной диффузии концентрации каждого из компонентов в обоих сосудах с течением времени выравниваются. Разность концентраций n_1 и n_2 в сосудах изменяется со временем t по закону

$$n_1 - n_2 = (n_1 - n_2)_0 e^{-t/\tau},$$

где $(n_1 - n_2)_0$ – разность концентраций в начальный момент времени, τ – постоянная времени процесса, определяющаяся геометрическими размерами установки и величиной коэффициента диффузии D . Для измерения разности концентраций используется зависимость теплопроводности газовой смеси от ее состава. В ходе эксперимента сосуды заполняются воздухом и смесью воздуха с гелием. Измерения проводятся при разных значениях давления воздуха в установке. По

результатам измерений строится график, выражающий экспоненциальный характер изменения концентраций газа. Также строится график зависимости коэффициента диффузии D от давления в координатах $(D, 1/P)$.

Лабораторный эксперимент по акустике для определения коэффициента взаимной диффузии газов. An acoustic laboratory experiment to determine the coefficient of mutual diffusion of gases. Ashkenazi S., Polturak E. *Amer. J. Phys.* **1988.** 56, № 9. С. 836-839. [РЖ 1989 3А139]

В предлагаемом эксперименте по определению коэффициента взаимной диффузии в двухкомпонентной газовой смеси используется зависимость скорости распространения звука от соотношения концентраций компонентов смеси. В общих чертах описана экспериментальная установка, основным элементом которой является цилиндрический резервуар с газовой смесью, к которому при помощи пьезодатчика подводится звуковой сигнал, снимаемый на другом торце резервуара аналогичным приемником. Обработка результатов измерений осуществляется при помощи сопряжения с установкой микроЭВМ. Точность результатов имеет погрешность порядка 10%.

3.2. Внутреннее трение

Определение коэффициента внутреннего трения жидкостей (относительно воды). А.П. Соколов. Физический практикум. **1926.** Задача 13. С. 91.

Коэффициент внутреннего трения жидкостей определяется по методу Оствальда измерением времени истечения одинаковых объемов различных жидкостей через один и тот же капилляр и по методу определения затухания в различных жидкостях колебаний твердого тела, подвешенного на упругой нити.

Определение коэффициента внутреннего трения жидкостей вискозиметром Оствальда. А.П. Соколов. Физический практикум. **1937, 1938.** Работа 25. С. 189.

Численное значение коэффициента внутреннего трения жидкости η определяется по методу Оствальда – измерением времени истечения одинаковых объемов жидкостей через один и тот же капилляр. При этом объем жидкости q , протекающий через капилляр в единицу времени выражается законом Пуазейля: $q = \pi r^4 \Delta p / 8l\eta$, где r – радиус капилляра, l – его длина, Δp – разность давлений на концах капилляра.

Определение коэффициента внутреннего трения жидкостей по методу Стокса и по методу затухания колебаний. А.П. Соколов. Физический практикум. **1937, 1938.** Работа 26. С. 193.

Метод Стокса состоит в измерении времени движения твердого шарика в исследуемой жидкости. Используются очень маленькие шарики из сплава Вуда (или ртути). Измерив скорость установившегося движения v_0 , зная плотности шарика d и жидкости d_0 , по формуле $\eta = (2/9)(d - d_0)gr^2/v_0$ вычисляют коэффициент внутреннего трения жидкости.

Прибор для наблюдения крутильных колебаний в жидкостях состоит из металлического диска со стержнем, на котором прикреплено зеркальце. Диск подвешен в горизонтальном положении на тонкой вертикальной проволочке. Задача сво-

дится к определению логарифмических декрементов затухания колебаний в жидкости и воздухе и периода колебаний диска. Эти величины связаны с коэффициентом внутреннего трения жидкости η соотношением: $\lambda = \lambda_0 + A\sqrt{(\pi/2)\delta T\eta}$. В этой формуле λ и T – логарифмический декремент затухания и период колебаний в данной жидкости, λ_0 – логарифмический декремент затухания в воздухе, δ – плотность жидкости и A – некоторая постоянная прибора, зависящая от радиуса диска и его момента инерции (указана на приборе).

Определение коэффициента внутреннего трения жидкостей при помощи капиллярного вискозиметра. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 23 а. М.-Л. 1949. С. 27.

Капиллярный вискозиметр состоит из U-образной трубки, в одном колене которой имеется капилляр. Измерения состоят в определении времени протекания жидкости через этот капилляр. Коэффициент внутреннего трения исследуемой жидкости η_2 вычисляется по формуле, выведенной на основе закона Пуазейля:

$$\eta_2 = \eta_1 \frac{d_2 t_2}{d_1 t_1},$$

где η_1 – коэффициент внутреннего трения эталонной жидкости, d_1 и d_2 – плотности эталонной и исследуемой жидкостей, t_1 и t_2 – времена протекания капилляра эталонной и исследуемой жидкостями.

Определение коэффициента внутреннего трения жидкостей методом Стокса. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 23 б. М.-Л. 1949. С. 30.

Метод Стокса основан на измерении скорости падения шарика определенных размеров в исследуемой жидкости. Прибор, применяемый для этих измерений, представляет собой стеклянный цилиндр, на поверхности которого имеются две горизонтальные метки, расстояние между которыми l . Цилиндр устанавливается вертикально и наполняется исследуемой жидкостью, в которую затем погружают очень маленький шарик. Падая внутри жидкости под действием силы тяжести, или, точнее, под действием своего веса с поправкой на его потерю в жидкости соответственно закону Архимеда, шарик встречает сопротивление, которое обусловлено вязкостью жидкости. Стокс показал, что сила сопротивления оказывается пропорциональной коэффициенту вязкости жидкости η , радиусу шарика r и скорости его движения v . Коэффициент пропорциональности в формуле оказался равным 6π : $F=6\pi \eta r v$. Расчетная формула для коэффициента вязкости η имеет вид:

$$\eta = \frac{2}{9} r^2 \frac{d - \rho}{l} g t,$$

где d и ρ – плотность шарика и жидкости соответственно, g – ускорение свободного падения, t – время движения шарика между метками.

Определение коэффициента внутреннего трения жидкостей методом затухания колебаний. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 23 с. М.-Л. 1949. С. 32.

Прибор для наблюдения затухающих колебаний в жидкостях состоит из металлического диска, в центре которого укреплен вертикальный стерженек с зеркальцем. Диск подвешен в горизонтальном положении на упругой проволоке. Внизу прибора помещается стеклянный сосуд, в который наливают исследуемую жидкость. Измерения коэффициентов внутреннего трения η жидкостей этим методом основаны на зависимости между η и логарифмическим декрементом затухания колебаний. Эта зависимость определяется формулой: $\theta = \theta_0 + A\sqrt{\pi\rho T\eta}$, где θ_0 и θ – логарифмический декремент затухания при колебаниях диска соответственно в воздухе и в исследуемой жидкости, ρ – ее плотность, T – период полного колебания диска в жидкости, A – некоторый постоянный коэффициент, зависящий от радиуса диска и его момента инерции. Из этой формулы находим:

$$\eta = \frac{1}{\pi\rho T} \left(\frac{\theta - \theta_0}{A} \right)^2.$$

Определение коэффициента внутреннего трения и диаметра молекул газов при помощи капиллярного вискозиметра. К. П. Яковлев. Физический практикум. Работа 23 d. М.-Л. 1949. С. 34.

Для случая ламинарного течения газа, которое носит стационарный характер, по узкому капилляру, справедлива формула, выражающая закон Пуазейля:

$$v = \frac{\pi\Delta P r^4}{8\eta l} \cdot t,$$

где ΔP – падение давления в капилляре, r и l – радиус и длина капилляра, η – коэффициент вязкости газа, t – время протекания через капилляр газа, объем которого равен объему капилляра. Из этой формулы выражаем коэффициент вязкости газа:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8lV} t.$$

Все величины, стоящие в правой части формулы, известны или измеряются в ходе эксперимента.

Для упрощения измерений можно откалибровать вискозиметр каким-либо газом, коэффициенты внутреннего трения которого при различных условиях (например, при различных температурах) хорошо известны. Обычно для этих целей применяют сухой воздух при определенных температуре и давлении. В этом случае коэффициент внутреннего трения исследуемого газа η_2 может быть определен по формуле

$$\eta_2 = \eta_1 \frac{t_2}{t_1},$$

где η_1 – коэффициент внутреннего трения сухого воздуха, а t_1 и t_2 – времена прохождения через капилляр одинаковых объемов сухого воздуха и исследуемого газа соответственно.

Определение коэффициента внутреннего трения газа капиллярным вискозиметром. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред проф. В.И. Ивероновой. 1951. Задача 30. С. 165-168. 1953, 1955. Задача 30. С. 167-170. М. 1962. Задача 33. С. 169-171. 1967. Задача 49. С.237-239.

Если истечение газа из сосуда совершается через достаточно короткий капилляр, то давление, под которым находится газ у входа в капилляр, незначительно отличается от давления газа у выхода из капилляра. Тогда плотность газа вдоль оси капилляра остается практически неизменной, газ можно считать несжимаемым, и можно использовать выражение

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8l} \frac{\Delta t}{\Delta V} \Delta p ,$$

где ΔV – объем газа, протекший через капилляр длиной l за время Δt , Δp – разность давлений на концах капилляра, η – коэффициент внутреннего трения газа.

Определение коэффициента внутреннего трения жидкостей по методу Стокса. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. 1951. Задача 31. С. 168-171. 1953, 1955. Задача 31. С. 170-173. 1962. Задача 31. С. 163-167. 1967. Задача 46. С.226-230.

Если шарик падает в жидкости, простирающейся безгранично по всем направлениям, не оставляя за собой никаких завихрений (малая скорость падения, маленький шарик, то, как показал Стокс, сила сопротивления равна

$$f = 6\pi\eta vr ,$$

где η – коэффициент внутреннего трения жидкости, v – скорость шарика, r – его радиус. После опускания шарика в цилиндр с жидкостью в момент прохождения шарика против верхней метки на стенке сосуда пускают в ход секундомер. В момент прохождения шариком второй метки секундомер останавливают. На стенке сосуда есть и третья, еще ниже расположенная метка, которая может рассматриваться как резервная в случае пропуска момента прохождения второй метки. Эта третья метка используется при дополнительном исследовании, целью которого является определение максимального радиуса шарика, с которым можно проводить описанный опыт.

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу наблюдения затухания колебаний. Задача 32. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В. И. Ивероновой. 1951. Задача 32. С. 171-174. 1953, 1955. Задача 32. С. 173-176.

Определяется вязкость воды и бензола. Для этого определяется декремент затухания и период колебания цилиндра с жидкостью и без жидкости, а также другие величины, которые входят в формулу

$$\nu = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K}{MR} \right)^2 \frac{\left(\delta - \frac{\tau}{\tau_0} \delta_0 \right)^2}{\tau}$$

Здесь ν – кинематическая вязкость исследуемой жидкости, K – момент инерции пустого стакана с крышкой и зеркальцем относительно его оси, M – масса жидкости, наполняющей стакан, R – внутренний радиус стакана, τ_0 – период колебаний подвесной системы в собранном виде (но без жидкости), δ – логарифмический декремент затухания колебаний всей системы с жидкостью внутри стакана, τ – период этих колебаний, δ_0 – логарифмический декремент затухания колебаний системы, но без жидкости внутри стакана,

Установка состоит из штатива с подвешенным на стальной проволоке цилиндром, осветителя и изогнутой шкалы для отсчетов. На крышке цилиндра смонтировано зеркальце. Луч света от осветителя попадает на зеркальце и, отразившись от него, дает изображение в виде тонкой светлой полосы на изогнутой шкале. Для сообщения вращательного импульса цилиндру головка штатива, в которой укреплен верхний конец проволоки, медленно поворачивается на небольшой угол и быстро возвращается в исходное положение.

Определение относительной вязкости вискозиметром Оствальда. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, 1959. Работа 26. С. 91-93.

Определение вязкости жидкости по методу Стокса. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть 1. Работа 13. Составлено: Н.Н. Вередеревской, И.Е. Иродовым, В.И. Майковой и др. Под ред. проф. И.В. Савельева. С. 109. МИФИ. Кафедра общей физики. 1960.

Вычисление продолжительности существования водяного столба в качестве лабораторного примера экспоненциального затухания. Smithson J.R., Pinkston E.R. Half-life of a water column as a laboratory exercise in exponential decay. "Amer. J. Phys.", 1960, 28, № 8. С. 740-742. [РЖФиз. 1961 8А64].

В качестве примера экспоненциального затухания для студентов 2-го курса разработан эксперимент с истечением воды из вертикальной трубы высотой 1.2 м и внутренним диаметром 16 мм через горизонтальную капиллярную трубку длиной 1, 2 м и с просветом 1,2–1, 75 мм. При этом движение воды подчиняется законам движения вязкой жидкости. Эксперимент дает хорошие численные результаты. Приведена теория эксперимента и фотоснимки установки.

Абсолютная вязкость воды. Студенческий эксперимент. Ctrny Laurence C. Absolute viscosity of water, a student experiment. "Amer. J. Phys.", 1961, 29, № 10, 708-709. [РЖФиз. 1962 4А54].

Описанная ранее установка (РЖФиз., 1961, 8А64) может служить для количественного эксперимента по определению абсолютной вязкости воды. Такое определение дает учащимся иллюстрацию прямолинейной зависимости в полупологарифмических координатах, применения метода наименьших квадратов к собственным данным и определения численного значения вязкости воды. Точность определения $\approx \pm 5\%$. Приведены расчетные формулы и графики.

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости капиллярным вискозиметром. Физический практикум. Механика и молекулярная физи-

ка. Под ред. В.И. Ивероновой. 1962. Задача 32. С 167-169. 1967. Задача 47. С.230-232.

На основе закона Пуазейля для ламинарного течения жидкости по трубам (капиллярам) получена формула для определения относительного коэффициента вязкости

$$\eta_1 = \eta_0 \frac{t_1 \rho_1}{t_0 \rho_0},$$

где t_1 и t_0 – времена истечения двух жидкостей, ρ_1 и ρ_0 – их плотности, η_1 и η_0 их коэффициенты внутреннего трения, при этом величина η_0 известна.

Определение коэффициента внутреннего трения вязких сред ротационным вискозиметром М.П. Воларовича. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В.И. Ивероновой. 1962. Задача 34. С. 172-176. 1967. Задача 48. С.233-237.

Основой прибора являются два строго коаксиальных вертикальных латунных цилиндра, внешний из которых может вращаться. Исследуемая жидкость помещается в полость между цилиндрами. Основной измеряемой величиной является время определенного числа поворотов подвижного цилиндра. В работе используется вискозиметр РВ-8. Имеется возможность измерения вязкости при различных температурах.

Определение коэффициента вязкости воздуха по истечению из капилляра. Физический практикум. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. 1962. Работа 13. С. 69.

Определение коэффициента вязкости воздуха по колебаниям диска. Физический практикум. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. 1962. Работа 14. С. 75.

Определение коэффициента внутреннего трения воздуха вискозиметром. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Д.А. Зимин. Ивановский текст. ин-т. Иваново. 1963. Работа 8. С. 42-45.

Затухающие механические колебания и их использование для определения коэффициента вязкости. Hartling Otto. Gedampfte mechanische Schwingungen und ihre Auswertung zur Bestimmung der Viskositat. "Prax. Naturwiss.", 1963, A12, № 10, Physik, 255-256. [РЖФиз. 1964 4A86].

К нижнему концу пружины подвешивают груз массой 1 кг, к грузу подвешивают небольшой легкий шарик. Если опустить шарик в сосуд с исследуемой жидкостью и растянуть пружину, возникают затухающие механические колебания. Для определения амплитуды колебаний к грузу прикрепляют горизонтальный указатель, который во время движения шарика перемещается относительно вертикальной шкалы. Приведены расчеты, согласно которым, измерив логарифмический декремент затухания, массу шарика и его радиус, можно рассчитать коэффициент вязкости жидкости.

Определение коэффициента внутреннего трения жидкостей по методу Стокса. Под ред. Л. Л. Гольдина. 1964. Работа 22. С. 137-142. 1973. Работа 20. С. 140-146.

Для измерений используется стеклянный цилиндрический сосуд, наполненный исследуемой жидкостью (глицерин, касторовое масло). Диаметр сосуда ~ 3 см, длина ~ 40 см. На стенках сосуда нанесены две метки на некотором расстоянии l друг от друга. Верхняя метка должна располагаться ниже уровня жидкости с таким расчетом, чтобы скорость шарика к моменту прохождения верхней метки успевала установиться. Измеряя расстояние между метками с помощью линейки, а время падения с помощью секундомера, определяют скорость шарика $v_{уст}$. Коэффициент вязкости η после измерения необходимых величин вычисляется по формуле:

$$\eta = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho - \rho_{ж}}{\left(1 + 2,4 \frac{r}{R}\right) v_{уст}},$$

где g – ускорение свободного падения, r – радиус шарика, R – радиус сосуда, ρ – плотность материала шарика, ρ_0 – плотность жидкости. По результатам измерений, выполненных при разных температурах, строится график зависимости $\eta(T)$. Для каждого опыта вычисляется число Рейнольдса $Re = vr\rho_{ж}/\eta$.

Лабораторный эксперимент по вязкости воздуха для студентов второго курса. Oppenheimer Frank. Sophomore-laboratory experiment on the viscosity of air. “*Amer. J. Phys.*”, 1964, 32, № 7, 526-528. [РЖФиз. 1965 2A73].

Описана лабораторная установка, предназначенная для определения коэффициента динамической вязкости воздуха и его зависимости от давления с целью проверки формулы кинетической теории газов. Использован дисковый вискозиметр, измеряется декремент затухания вращательных колебаний диска.

Определение вязкости жидкости по методу Стокса. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть I. И.Е.Иродов, Г.Н. Кутузова, В. И. Майкова и др. Москва, 1965. Работа 11. С. 99.

Определение коэффициента вязкости воздуха по колебаниям диска. Физический практикум. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. 1965. Работа 14. С. 75-80.

Экспериментальное исследование движения в средах с сопротивлением. Stocker Heinrich. Experimentelle Untersuchungen an Bewegungen in widerstehenden Mittel. “*Prax. Naturwiss.*”, 1965, A14, № 10 “Physik”, 261-268. [РЖФиз. 1966 5A78].

Описываются общие вопросы сопротивления движению в зависимости от формы и скорости движущихся тел и ряд опытов, демонстрирующих закон Стокса, пропорциональность сопротивления квадрату скорости при свободном падении тел в воздухе, движение круглых тел в воде под действием постоянной силы и др. Приведены расчетные формулы и графические результаты измерений.

Простой опыт с вискозиметром. Simple viscosimetric experiment. “*Amer. J. Phys.*”, **1965**, 33, № 10 848. [РЖФиз. 1966 5A79].

Стеклянную трубу (диаметром 5 см, длиной 30 см) закрывают с двух сторон плотными резиновыми пробками. Через отверстие в верхней пробке вводят примерно на 2/3 длины прибора трубку меньшего диаметра, а через отверстие в нижней пробке проходит выводная трубка, связанная гибким шлангом с горизонтально установленным капилляром. Прибор заполняют водой, которая вытекает через капилляр под постоянным давлением, равным высоте столба воды между нижним срезом верхней трубки и уровнем капилляра. Прибор позволяет легко изучать зависимость скорости истечения воды через капилляр от давления.

Зависимость вязкости газов от температуры и давления. Cronin David J. Temperature and pressure dependence of the viscosity of gases. “*Amer. J. Phys.*”, **1965**, 33, № 10, 835-840. [РЖФиз. 1966 5A80].

Вязкость измеряют методом истечения газа через капилляр. В отличие от обычной методики, при которой поддерживается постоянная разность давлений у концов капилляра, здесь рекомендуется значительно более простой способ: поддерживать постоянное давление у выхода капилляра и изменять разность давлений, а следовательно и среднее давление в капилляре. Такая методика допустима в тех пределах, в каких вязкость является независимой от давления. При аккуратном проведении опыта можно добиться точности измерений в 2-3 % для воздуха, азота, аргона, гелия и водорода в диапазоне температур 77-295⁰ К.

Законы Аристотеля и Стокса. Bostrup Ole, Jensen Carl C. Aristoteles' og Stokes love. “*Fys. Tidsskr.*”, **1965**, 63, № 1, 44-46. [РЖФиз. 1967 1A38].

Если заставить круглые шарики радиуса R медленно, со скоростью v падать внутри жидкости, то сопротивление движению будет определяться законом Стокса $M = 6\pi\eta Rv$. Для того, чтобы шарики оставались взвешенными внутри жидкости, необходимо, чтобы сила тяжести уравнивалась силой выталкивания и силой сопротивления вязкой жидкости, откуда получается для скорости условие:

$$v = \frac{2g(\rho - \rho_0)}{9\eta} R^2 .$$

Если все шарики одного радиуса и их плотность значительно превышает плотность жидкости $\rho \gg \rho_0$, то выражение для скорости приводится к виду $v = k(T/\eta)$, где T – сила тяжести, k – численный коэффициент. Это выражение совпадает с выражением закона падения Аристотеля: скорость тела пропорциональна движущей силе и обратно пропорциональна сопротивлению движения. Приводится краткое описание лабораторной работы по изучению закона Стокса.

Опыт модернизации лабораторной работы по закону Стокса. Лисенков Н.А. “Изв. высш. учебн. заведений. Физика.” **1968**, № 11, 150-152. [РЖ 1969 5A38].

Описана лабораторная работа, целью которой является наблюдение отклонений от закона Стокса и изучение их закономерного характера. Рекомендуется провести измерения установившейся скорости шаров разных диаметров и построить график зависимости V от d^2 , где d – диаметр шара. Из результатов

опытов следует, что чем крупнее шар, тем больше отклонение от следующей из закона Стокса линейной зависимости $V(d^2)$. Приведена формула множителя для учета влияния стенок, методика количественной оценки отклонений, результаты измерений и конструкция пусковых устройств для малых и больших шаров.

Измерение динамической вязкости жидкости (метод падающего шарика). Müssing Bernhard . Dynamisch Viskositätsmessung (Kugelfall method). "Prax. Naturwiss". 1973, Teil 1, 22, № 10, 270-271. [РЖ 1974 3А88].

Описывается опыт по определению динамической вязкости жидкости. Приводится вывод расчетной формулы

$$\eta = \frac{2gr^2(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})}{2v},$$

где r – радиус падающего шарика, $\rho_{\text{т}}$ – плотность шарика, $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, v – скорость шарика. В опыте используется мензурка, радиус которой должен быть значительно больше радиуса шарика, рейка с двумя ползунками и секундомер.

Определение коэффициента вязкости воздуха по скорости течения через тонкие трубки. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф. Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Изд. 2-е. "Наука". 1973. Работа 21. С. 147-152. 1983. Работа 3.2. С. 176-181.

При ламинарном течении объем V газа, протекающий за время t по трубе длины L и радиуса r , определяется формулой Пуазейля

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi r^4}{8L\eta}(p_1 - p_2),$$

где $(p_1 - p_2)$ – разность давлений в двух выбранных сечениях 1 и 2, расстояние между которыми L . Величину Q обычно называют расходом. Эта формула позволяет определять вязкость газа η по его расходу.

В проводимом эксперименте поток воздуха под давлением, несколько превышающим атмосферное (на 10-15 см вод. ст.), через газовый счетчик поступает в резервуар, к которому припаяны две тонкие металлические трубки. Для измерения давлений в трубках просверлен ряд миллиметровых отверстий. На время опыта к двум соседним отверстиям подсоединяется микроманометр, а остальные плотно закрываются завинчивающимися пробками. Для измерения коэффициента вязкости воздуха снимается зависимость разности давлений Δp в соседних отверстиях от расхода воздуха Q . Начиная с малых перепадов давлений, постепенно увеличивают расход воздуха. По полученным данным строится график. При ламинарном потоке зависимость Δp от Q должна носить линейный характер. При возникновении турбулентности линейность графика нарушается: разность давлений растет быстрее, чем расход. По крутизне наклона прямолинейного участка графика определяется коэффициент вязкости воздуха.

Простой метод определения вязкости жидкости. Simple method for determination of the viscosity of liquid. Peiris M.G., Tennakone K. "Amer. J. Phys.". 1980. 48, № 6, 497-498. [РЖ 1981 1А92].

Описан простой метод определения величины вязкости жидкости на основе измерения скорости жидкости, текущей по капиллярной трубке. Жидкость помещается в стеклянный капилляр длиной 1,6 м и внутренним радиусом от 0,01 см до 0,05 см. Трубка устанавливается вертикально в кювете с налитым в неё небольшим количеством жидкости, а верхний конец трубки открывается. С помощью секундомера измеряется время t , за которое уровень жидкости в капилляре снизится на высоту l . Затем вычисляется скорость v движения жидкости, и вязкость жидкости рассчитывается по формуле Пуазейля $\eta = (a^2 dg)8v$ где a – радиус капиллярной трубки, d – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения. Этот метод дает хорошие результаты для вязких жидкостей, таких как глицерин или крепкий раствор сахара. Для менее вязких жидкостей (вода) скорость вытекания жидкости сравнительно велика и трудно измерима. Для таких случаев рекомендуется измерять скорость жидкости в капилляре, расположенном под углом θ к вертикали и рассчитывать вязкость по формуле $\eta = (a^2 dg \cos \theta)8v$.

Вязкость. Viscosity. “*Phys. Teach.*”. 1982. 20, №1. 47-48. [РЖ 1982 7A67].

Описан ряд проблемных экспериментов, в которых изучается явление вязкости; эксперименты проводятся с подручными средствами.

Эксперимент, в котором изучается скорость вытекания холодной и горячей воды через маленькое отверстие в чашке. Несоответствие результатов опыта с представлениями теории объясняется сильной турбулентностью потока.

Падение воздушного шарика в воздухе. Сильное расхождение между скоростью падения шарика наблюдающейся в эксперименте, и скоростью, предсказанной формулой Стокса, возникает из-за турбулентности.

В опыте с шариком, падающем в глицерине или концентрированном сахарном сиропе, может быть определена величина вязкости среды (в этом случае поток ламинарен).

Опыт с ламинарным потоком воды. Две пластмассовые чашки, одна из которых непрерывно заполняется водой, соединяются пластмассовой трубкой на различных уровнях (дно 1-й чашки с верхом 2-й). Вода вытекает из 1-й чашки во 2-ю очень медленно, поток ламинарен. Время заполнения чашки водой соответствует предсказанному теорией формулой.

Определение зависимости вязкости жидкости от температуры. Мкртычева Н.М., Калухов В.А. “Сб. научн.-метод. ст. по физ.” (Москва), 1982. № 9. С. 39-43. [РЖ 1983 11A135].

Рассматривается постановка в курсе лабораторного эксперимента по определению зависимости вязкости жидкости от температуры, приводятся экспериментальные данные, определяется энергия активации.

Определение энергии активации по температурной зависимости вязкости жидкости. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. МФТИ. 1983. Лаб. работа 3.15. С. 255-261.

Для измерений используется стеклянный цилиндрический сосуд, наполненный исследуемой жидкостью (глицерин, касторовое масло). Диаметр сосуда ≈ 3 см, длина ≈ 40 см. На стенках сосуда нанесены две метки на некотором расстоянии d друг от друга. Измеряя расстояние между метками с помощью линей-

ки, а время падения с помощью секундомера, определяют скорость шарика $v_{уст.}$. Коэффициент вязкости жидкости η вычисляется по формуле

$$\eta = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho - \rho_{жс}}{v_{уст.}},$$

где g – ускорение свободного падения, r – радиус шарика, ρ – плотность материала шарика, $\rho_{жс}$ – плотность жидкости. Затем строится график зависимости $\ln \eta$ от $1/T$, и на основании пропорциональности $\eta \sim A \exp(W/kT)$, где W – энергия активации, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, A – константа, по угловому коэффициенту полученной прямой определяется энергия активации.

Определение вязкости жидкости по скорости истечения через капилляр. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Москва. Наука. 1983. Работа 3.1. С. 170-176.

Основным элементом установки является сосуд Мариотта, в нижней части боковой стенки которого укреплен калиброванная капиллярная трубка длиной l и радиуса R , служащая для вытекания жидкости. Сосуд Мариотта позволяет поддерживать постоянным перепад давления $P_1 - P_2$ на концах капилляра. Величина этого перепада определяется высотой столба жидкости h между осью капилляра и нижним концом вертикальной трубки, вставленной в сосуд Мариотта. По формуле Пуазейля

$$Q = \frac{V}{t} = \pi \frac{P_1 - P_2}{8\eta l} R^4$$

определяется расход воды при нескольких значениях h ; здесь V – объем вытекшей воды за время t , η – коэффициент вязкости воды, который предварительно можно принять равным 0,01 пуаза. Полученные результаты изображаются графически в виде зависимости $Q(h)$, по наклону которого находится величина коэффициента вязкости. Попутно определяется ламинарность течения жидкости в капилляре. В данной лабораторной работе определяется также вязкость водного раствора глицерина относительным методом на вискозиметре Оствальда.

Определение энергии активации по температурной зависимости вязкости жидкости. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Москва. Наука. 1983. Работа 3.15. С. 255-261.

Определение вязкости и основных характеристик молекулярного движения газов. Физический практикум. Под ред. Г.С. Кембровского. Минск. 1986. Работа 16. С. 132-137.

Определение вязкости жидкости методом Стокса. Физический практикум. Под ред. Г.С. Кембровского. Минск. 1986. Работа 17. С. 140-142.

Определение вязкости жидкости методом Пуазейля. Физический практикум. Под ред. Г.С. Кембровского. Минск. 1986. Работа 18. С. 142-144.

Определение кинематической вязкости жидкости. Физический практикум. Под ред. Г. С. Кембровского. Минск. 1986. Работа 19. С. 145-147.

Определение вязкости жидкости вискозиметром Оствальда. Физический практикум. Под ред. Г.С. Кембровского. Минск. 1986. Работа 20. С. 148-149.

Изучение зависимости коэффициента вязкости жидкости от температуры. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988. Лаб. работа 5.1. С. 126-130.

Определение коэффициента вязкости крови при помощи вискозиметра ВК-4. Физический практикум для медиков. Часть I. Т.К. Мюйрисепп, Х.В. Тераль. Тарту. 1988. Лаб. работа 8. С. 76-78.

Замечания к статье: Использование машины Атвуда для изучения закона Стокса. Comments on: using the Atwood machine to study Stokes law (*Amer. J. Phys.* 1986. 54. С. 904). Lindren E. R. *Amer. J. Phys.* 1988. 56, № 10. С. 940. [РЖ 1989 4A98]

Отмечается, что использование машины Атвуда для измерения силы вязкого трения (закон Стокса) проблематично, во-первых, из-за непостоянства силы трения в опорах во время движения грузов. Во-вторых, закон Стокса справедлив, если объем жидкости существенно больше объема сферических движущихся тел. В машине Атвуда используется тело цилиндрической формы. В общеизвестной статье, где используется мензурка объемом 2000 см^3 , ошибка измерения силы вязкого трения может достигать 25%–33%. Третий источник ошибок измерения определяется силами поверхностного натяжения.

Подъем жидкости в промокательной бумаге. Fluid uptake by a blotter. Bean C.P., Vubl J.I., Fanelli D.F. *Amer. J. Phys.* 1991. 59, № 6. 533-535. [РЖФиз. 1992-7A76].

Описан эксперимент по изучению подъема жидкости в пористых материалах, позволяющий проводить измерения с погрешностью менее 1%. Полоска промокательной бумаги располагается на горизонтальной поверхности так, что некоторая ее часть свисает вертикально и своим концом находится в подкрашенной жидкости. Положение фронта жидкости x на горизонтальном участке бумаги, согласно феноменологической теории, пропорционально \sqrt{t} , где t – промежуток времени, отсчитываемый от момента помещения полоски в сосуд с жидкостью. Эксперименты с растворами глицерина позволяют выявить зависимость коэффициента пропорциональности в зависимости $x(t)$ от вязкости жидкости.

Гидродинамика жидких кристаллов в лабораторной работе студентов первого курса. *Gydrodinamika cieklych krysztalow w I praconi fizycznej.* Janik Y., Kaczimarsky A.Q., Sokalsi K. *Post. Fiz.* 1992. 43, № 2. С. 185-188. [РЖФиз. 1993-1A102ДЕП].

Описан простой вращательный вискозиметр для демонстраций и измерения анизотропии вязкости нематических жидких кристаллов на основе определения угловой скорости вращения цилиндра в жидком кристалле. Подчеркивает-

ся, что описанный способ измерения вязкости может использоваться как в учебных, так и научных целях.

Использование преобразователей давления в лабораторных экспериментах. II Экспериментальная проверка закона Пуазейля. Применение в экспериментах по измерению вязкости. Электрическая аналогия. Use of pressure transducers in laboratory experiments. II. Experimental verification of the Hagen-Poiseuille law. Application to viscosity measurement. Electrical analogy. Victoria L., Molina C., Arenas A., Ibanez J. A. *Amer.J. Phys.* **1996.** 64, №3. 322-326 [РЖ 1996 12A101.]

Определение критических параметров жидкости. П.С. Булкин, И.И. Попова. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Изд. моск. ун-та. **1999.** Лаб. работа 4.1. С. 88-95.

В состав экспериментальной установки входят термостат, рефрактометр, вискозиметр и прибор для измерения коэффициента поверхностного натяжения. Измерения коэффициента вязкости производятся путем определения времени падения цилиндра в вискозиметре. Значения коэффициента поверхностного натяжения определяются по разности высот менисков в двух капиллярах прибора с помощью микроскопа.

Измерение теплоты парообразования и вязкости воды. П.С. Булкин, И.И. Попова. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Изд. моск. ун-та. **1999.** Лаб. работа 4.2. С. 95-100.

В состав экспериментальной установки входят термостат, и приборы для измерения вязкости и давления насыщенных паров. В ходе работы измеряется давление насыщенных паров воды, ее вязкость как функция температуры. Проверяется соотношение Бачинского, рассчитываются теплота парообразования, энергия активации ряд других характеристик. Получаемые результаты позволяют проиллюстрировать некоторые особенности воды, связанные со способностью ее молекул к ассоциации.

Изучение зависимости коэффициента вязкости жидкости от температуры. П.С. Булкин, И.И. Попова. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Изд. моск. ун-та. **1999.** Лаб. работа 5.1. С. 126-130.

Исследуемая жидкость помещается в вертикальную запаянную трубку. В трубке находится металлический шарик. В данной работе применяется относительный метод измерения вязкости. Диаметр шарика близок к диаметру трубки. Для определения вязкости жидкости необходимо измерить время движения шарика между двумя метками, нанесенными на трубку, которое пропорционально коэффициенту вязкости жидкости. Трубка с исследуемой жидкостью окружена рубашкой, по которой циркулирует вода от термостата. Температура воды, а вместе с ней и температура исследуемой жидкости могут меняться заданным образом.

Измерение коэффициента вязкости методом падающих мячей. Wen J. Zhuzhou gonyxueyuan xuebao = J. Zhuzhou Inst. Technol. **2000.** 14, №1. 49-50. [РЖ 03.04-18A.149].

Применение новых кварцевых микровесов в качестве датчика при исследовании вязкости масла. Zhang J., Ma X., Zhang Y. Xi'an jiaotong daxue xuebao = J. Xi'an Jiaotong Univ. **2002.** 36, №5. 515-518. [РЖ-2003 №1-18А.158].

Измерение динамической вязкости жидкости по затуханию колебаний камертона. Жданов А.Г., Пятаков А.П., Физ. образование в вузах. **2002.** 8, № 4. 117-126, 155. [РЖ 03.12-18А. 162].

Предлагается методика определения динамической вязкости жидкости по затуханию колебаний высокочастотного камертона. Колебания камертона регистрируются с помощью микрофона, подключенного к компьютеру. Данный метод может быть использован для создания лабораторной установки вискозиметра при обучении основам теории колебаний и явлений переноса. Благодаря ряду преимуществ (работа с малыми объемами жидкостей – менее 1мл, возможность работы в режиме реального времени в широком диапазоне значений вязкости жидкости), установка может быть также полезна в ряде практических приложений, например при биореологическом анализе крови.

Вязкости инертных газов: учебная аппаратура. Rare gas viscosities: A learning tool. Halpern A.M. J. Chem. Educ. **2002.** 79, №2. 214-216. [РЖ 03.05-18А.141].

Описаны экспериментальная методика и аппаратура, с использованием которых студенты определяют вязкости ряда инертных газов (He, Ne, Ar, Kr и Xe, а также SF₆). Методика основана на прямом применении закона Пуазейля, в котором предполагается ламинарный поток. Вязкости газов определяются с исключительно высокой точностью (относительное стандартное отклонение $\approx 10^{-3}$).

Определение вязкости воды при температурах 30÷50° С относительным методом с помощью капиллярного вискозиметра. Смирнова Т.П., Евдокимова Л.А. ФССО-03. Труды седьмой Межд. конф. С.-Пбг. **2003.** С. 129-131.

Основой экспериментального метода определения температурной зависимости сдвиговой вязкости воды с помощью капиллярного вискозиметра является гидродинамическая модель текущей жидкости как сплошной несжимаемой среды, между частицами которой действуют силы давления и силы вязкого трения. Основным элементом капиллярного вискозиметра, используемого в данной работе, представляет собой U-образную трубку, в одно колено которой впаян капилляр диаметром 0,34 мм. После предварительного заполнения трубки жидкостью ей предоставляют возможность свободно протекать через капилляр. В ходе эксперимента отмечают моменты прохождения мениска мимо меток на капилляре, и, таким образом, определяют промежуток времени, за который известный объем жидкости пртекает через капилляр. Коэффициент вязкости η дистиллированной воды при температуре t вычисляется по формуле $\eta = \eta_0 \rho t / \rho_0 t_0$, где η_0 – коэффициент вязкости воды при температуре 20 °С, ρ и ρ_0 – плотность воды при температуре t и t_0 соответственно. Измерение коэффициента вязкости воды при температурах выше 20 °С производится в процессе ее охлаждения вместе с термостатом (сосуд емкостью 5 л, наполненный горячей водой). Для обезгаживания дистиллированную воду необходимо предварительно прокипятить в течение 10 мин.

Лабораторная работа по углублённому исследованию температурной зависимости вязкости воды. Евдокимова Л.А., Смирнова Т.П. Физ. образ. в вузах. **2003.** 9, № 1. 139-154. [РЖ 04.02.-18А.157].

Учебно-исследовательская работа общезначимого практикума по молекулярной физике и термодинамике поставлена для студентов как то: физиков, химиков, биологов, фармацевтов и т. д.– с целью углублённого изучения свойств жидкой воды – системы с межмолекулярными взаимодействиями чрезвычайно сложного характера (водородными связями). Для определения сдвиговой вязкости воды используется капиллярный вискозиметр. Формула Пуазейля получена на основе рассмотрения сил, действующих на элемент жидкости, имеющий форму тонкостенного цилиндра. Полученные результаты хорошо согласуются с табличными данными и дырочной моделью, рассмотренной Я.И. Френкелем в “Кинематической теории жидкости”. Методическая разработка предполагает усиление индивидуальной и самостоятельной работы студентов с учётом их профессиональной направленности.

Прибор для измерения вязкости и плотности, имеющий ротор с магнитным приводом. A viscosity and density meter with a magnetically suspended rotor. Bano M., Strharsky I., Hrmo I. *Rev. Sci Instrum.* **2003.** 74. № 11. 4788-4793. [РЖ 05.03-18А.133].

Описан прибор для измерения вязкости и плотности жидких сред в условиях постоянной температуры или при температуре, изменяющейся по определённому закону. Вязкость измеряют по методу Сувейте, в котором используют 2 коаксиальных цилиндра, внешний из которых вращают с помощью магнитного привода. Вязкость рассчитывают по угловой скорости вращения ротора, а плотность – по величине вертикальной уравнивающей силы. Для измерения требуется 1,6 мл жидкости; погрешность измерения $\pm 0,1\%$; интервал измерения плотности 0,7–1,4 г/мл, вязкости $3 \cdot 10^{-4} - 0,3 \text{ Pa} \cdot \text{c}$.

Применение светодиодов и фотодиодов, соединённых оптоволоконными, к изучению зависимости вязкости жидкости от температуры. Application of light-emitting diodes and viscosity on temperature. Victoria L., Arenas A., Moline C. *J. Chem. Educ.* **2004.** 81, № 9. 1333-1336. [РЖ 06.07-18А.143].

Определение вязкости по скорости падения цилиндрических образцов в круглой вертикальной трубке, наполненной жидкостью. Алимаев М.Г., Базаев А.Р. Вестник Дагестанского научного центра. **2005.** № 21. 24-28. [РЖ 07.12-18А.142].

Предложен метод определения вязкости чистых жидкостей и растворов, основанный на измерении времени падения цилиндра с обтекаемой формой на концах в вертикально установленной стеклянной трубке, наполненной исследуемой жидкостью. Метод строго обоснован теоретическими решениями и опробован на ряде жидкостей экспериментально. Торцевые эффекты обтекания учтены тарировкой плотности цилиндра по известной вязкости чистой воды. Метод опробован на двух видах цилиндрических образцов: сплошном цилиндре и цилиндре с осевым отверстием малого диаметра.

Определение вязкости жидкости с помощью изучения броуновского движения в студенческой учебной лаборатории. Finding viscosity of liquids from Brounian motion at student's laboratory. Greczyio Tomasz, Debowska Ewa. *Eur. J. Phys.* **2005.** 26, № 5, 827-833. [РЖФиз. 2006 5-18A.146].

Недорогой эксперимент по изучению ньютоновских и неньютоновских жидкостей. A low-cost experiment on Newtonian and non-Newtonian fluids. Dolr M., Delegido J., Casanovas A., Hernandez M.-J. *J. Chem. Educ.* **2005.** 82, № 3. 445-447. [РЖ 08.05-18A.130].

Вязкость — известная тема для студентов, они знают, что это свойство определяет сопротивление жидкости течению и скорость течения. Вязкость определяется вискозиметрами различного типа, некоторые из них используются в лабораторных работах студентов. Предлагается недорогой эксперимент по изучению различий в течении ньютоновских и неньютоновских жидкостей с использованием оригинального точного прибора. Эксперимент основан на измерении при различных скоростях сил трения на сфере в движущейся жидкости.

Определение вязкости с помощью флуоресцентной деполяризации молекул. Viscosity by fluorescence depolarization of probe molecules. Windisch Charles I. (Jr), Exarhos Gregory J., Sharma Shiv K.J. *Chem Educ.* **2005.** 82, № 6, 916-918. [РЖФиз. 2006 11-18A136].

Описан эксперимент в курсе физической химии, иллюстрирующий использование флуоресцентной деполяризации молекул для определения вязкости смеси масел. Отмечена взаимосвязь физических (вязкость, консистенция) и спектрометрических (флуоресценция, молекулярное вращение) свойств вещества.

Об определении вязкости воздуха по времени его истечения через капилляр. Карелин Б.В., Кустова Н.Р. *Физическое образование в вузах* **2006.** 12, № 2. 106-108,121. [РЖ 07.05-18A.131].

Предлагается лабораторная работа по определению коэффициента вязкости воздуха, выполняемая с использованием оборудования, предназначенного для определения показателя адиабаты методом Клемана-Дезорма.

Использование комплекса по изучению свойств жидкого металла Си спецпрактикума студентов, обучающихся по специальности «Физика». Шмакова Ш.Ю., Вьюхин В.В., Вандышева И.В., Тягунов А.Г. Школа и вуз: достижения и проблемы непрерывного физического образования: Сборник научных трудов 4 Российской научно-методической конференции учителей школ и преподавателей вузов. Екатеринбург, **2006.** Екатеринбург.2006.154-157.[РЖ 07.10-18A.134].

Комплекс включает установки по измерению удельного электросопротивления, кинематической вязкости и поверхностного натяжения. Для измерения кинематической вязкости используется метод крутильных колебаний тигля с расплавом. Для высокотемпературных исследований плотности и поверхностного натяжения расплавов на основе железа предпочтение отдается, как правило, методу лежащей капли. Одним из достоинств этого метода является возможность одновременного определения поверхностного натяжения и плотности расплава. В ходе проведения экспериментов студенты знакомятся с основами вакуумной техники, а также осваивают различные методы измерения физических

свойств материалов. Полученные результаты проходят комплексную обработку. Обсуждение политерм физических свойств ведется с привлечением справочной литературы.

Исследование вихревых полос (следов) за реальными и виртуальными телами необтекаемой формы. Investigating vortex streets behind real and virtual bluff bodies. Afanasyev Y.D., Deacon C.G. *Amer. J. Phys.* **2006.** 74. № 3. 236-240. [РЖ 08.07-18А.127].

Описывается лабораторный эксперимент по изучению регулярных последовательных вихрей, возникающих за объектом в потоке жидкости. Это явление наблюдается в индустриальных потоках, течениях в океане и атмосфере. В первой части описывается поток за цилиндром. Во второй части — влияние тела на поток, имитированное силовым полем, без наличия реального тела в жидкости. Поле сил (виртуальное тело) создается постоянным магнитом, расположенным над поверхностью воды, в комбинации с электрическим током в горизонтальном направлении.

Инновационный метод изучения закона Стокса в лаборатории. An innovative method to study Stokes' law in the laboratory. Wadhwa A. *Phys. Educ.* **2008.** 43, № 3. 301-304. [РЖ 09.09-18А.103].

3.1. Теплопроводность

3.1.1. Теплопроводность газов

Определение коэффициента теплопроводности воздуха. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В.И. Ивероновой. **1962.** Задача 30. С. 158-162. **1967.** Задача 44. С.217-222.

Экспериментальная установка состоит из вертикально расположенной медной трубки диаметром $y_1=10$ мм и длиной l , по оси которой натягивается никелевая проволока диаметром $y_2=0,2$ мм, подведенная к клеммам, расположенным на концах трубки и изолированным от нее. Торцы трубки воздухонепроницаемы. Объем трубки соединен с водоструйным насосом и вакуумметром. Если проволоку нагревать током, а температуру стенки трубки поддерживать постоянной, то в направлении радиуса трубки возникнет градиент температуры. Образуется поток тепла от проволоки к стенкам трубки. Чтобы определить коэффициент теплопроводности воздуха, находящегося в пространстве между проволокой и стенками трубки, надо знать количество тепла, переносимое от проволоки к стенке трубки путем теплопроводности, разность температур между слоями газа, непосредственно прилегающими к поверхностям проволоки и трубки и размеры проволоки и трубки. Теоретический анализ происходящего в установке процесса теплопроводности приводит к формуле

$$\lambda = \frac{0,24 \ln(y_1/y_2)}{2\pi l} \frac{I^2 R_1 R_2 \alpha}{(R_2 - R_1)(1 + \alpha t_1)},$$

где I – сила тока, текущего по проволоке, R_1 и R_2 – сопротивление проволоки до ее нагрева (при температуре t_1), α – температурный коэффициент сопротивления вещества проволоки.

Определение коэффициента теплопередачи при естественной конвекции. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Сост.: А.Г. Белянкиным, Г.П. Мотулевич, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. М. 1962. Задача 38.С. 186-190. 1967. Задача 45.С.222-226.

Процесс передачи тепла от одного тела к другому может осуществляться путем излучения, конвекции или теплопроводности. Экспериментальная установка состоит из горизонтально расположенной медной трубки, внутри которой по оси натянута нихромовая проволока, служащая нагревателем – по ней пропускается электрический ток. Медная трубка нагревается и отдает тепло окружающему ее воздуху. Для измерения температуры наружной поверхности трубки на ней укреплены термомпары. Коэффициент теплоотдачи излучением определяется выражением

$$\alpha_L = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2},$$

где A – коэффициент, характеризующий поглощательную способность тела (для меди $A=0,7$), σ – универсальная постоянная Стефана–Больцмана, T_1 – температура излучающего тела, T_2 – температура окружающей среды. Коэффициент суммарной теплоотдачи

$$\alpha = \frac{0,24UI}{\pi dl(T_1 - T_2)},$$

где U – разность потенциалов на концах проволоки-нагревателя, I – сила тока, d – внешний диаметр трубки, l – длина трубки. При этом суммарный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_L,$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи.

Показано, что коэффициент теплоотдачи может быть выражен формулой

$$\alpha_k = \frac{\lambda}{d} B [224(T_1 - T_2)]^n,$$

где B и n – величины, определяемые видом конвекционных потоков воздуха, λ – коэффициент теплопроводности воздуха, d – внешний диаметр трубки. После логарифмирования получается

$$\lg \frac{\alpha_k d}{\lambda} = n \lg [224(T_1 - T_2)] + \lg B.$$

Для определения величин B и n строят график, откладывая по оси абсцисс величину $n \lg [224(T_1 - T_2)]$, по оси ординат – $\lg(\alpha_k d / \lambda)$. Проводимая прямая линия отсекает на оси ординат величину $\lg B$, что позволяет определить численное значение B . Величину n находят по крутизне наклона проведенной прямой линии. Определив таким образом B и n , находят коэффициент конвекционной теплоотдачи

$$\alpha_k = \frac{d}{\lambda} B [224(T_1 - T_2)]^n.$$

Определение коэффициента теплопроводности газов. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Сост.: Л.Л. Гольдиным, С.М. Козелом, Н.Н. Колачевским и др. Изд. “Наука”. М., 1964. Работа 23. С. 142-147.

Исследуемый газ заполняет пространство между двумя длинными коаксиальными цилиндрами, температуры которых – T_1 и T_2 – поддерживаются постоянными. В качестве внутреннего цилиндра используется тонкая никелевая проволока диаметром $2R_1=0,13$ мм длины $L=27$ см. Она натянута по оси медной трубки диаметра $2R_2=10$ мм. Проволока нагревается электрическим током; ее температура определяется по изменению электрического сопротивления. Медная трубка находится в кожухе, через который пропускается либо вода из водопровода, либо пар из парообразователя. Температура T_2 воды (или пара) измеряется термометром. Коэффициент теплопроводности вычисляется по формуле

$$\sigma = \frac{q}{T_1 - T_2} \frac{1}{2\pi L} \ln \frac{R_2}{R_1},$$

где q – количество теплоты, протекающее через газ, равно количеству теплоты, выделяемому током в проволоке; оно может быть определено по закону Джоуля–Ленца.

Определение коэффициента теплопроводности газов и исследование температурного скачка на стенках сосуда. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Изд. 2-е. “Наука”. 1973. Работа 22. С. 152-159.

Лабораторная работа “Исследование процессов теплопередачи”. Юносов Ф. “Сб. научно-методич. статей по физике. Мин-во высш. и среднго специального образования СССР”, 1975, вып. 4, 73-76. [РЖ 1976 5A116].

Описана лабораторная работа по изучению физических процессов теплопередачи от нагретой электрическим током проволоки в окружающую среду. Одним из практических аспектов этого вопроса является экспериментальное определение критического значения силы тока $I_{кр}$, при котором проволока перегорает, и построение зависимости $I_{кр}$ от диаметра проволоки. Рассмотрены теоретические предпосылки работы, описана лабораторная установка и порядок выполнения работы, приведено обсуждение результатов. Работа может непосредственно использоваться на практике для расчета плавких предохранителей, нагревательных печей и т.п.

Эксперименты по изучению нестационарной теплопроводности. Parsche Heinz, Luchner Karl. Experimente zur nichtstationare Wärmeleitung. “Phys. und Didakt”. 1978. 6, № 4. 313-331. [РЖ 1979 5A76].

В общем случае задача о распространении тепла в теле состоит в отыскании зависимости температуры в каждой точке тела от времени при различных граничных условиях. Описаны эксперименты по исследованию процесса распространения тепла в однородном стержне, один конец которого поддерживается при постоянной температуре, а на другом устанавливается произвольный тепло-

вой режим. Изменение температуры регистрируется термопарами, размещенными вдоль стержня. Материал стержня и граничные условия можно менять. Процессы распространения тела хорошо моделируются электрическими процессами. Аналогом температуры служит электрическое напряжение. Даны схемы, с помощью которых на экране осциллографа можно наблюдать процессы, имитирующие распространение тепла в стержне, один конец которого поддерживается при постоянной температуре или теплоизолирован, а на другом создаются произвольные тепловые условия: скачок температуры, временной прямоугольный импульс температуры и т.п. Приведены схемы моделирования процессов теплопроводности, связанных с дневными и годовыми колебаниями температуры на поверхности Земли. Приведены также примеры электрического моделирования процессов диффузии.

Измерение удельной теплопроводности газов в студенческой физической лаборатории. Measurement of thermal conductivity of gases in an undergraduate physics laboratory. Ottonello P., Valbusa U. "Amer. J. Phys.". 1980. 48, № 6. 489-490. [РЖ 1981 1А89].

Удельная теплопроводность некоторых газов в лабораторной программе высшей школы может быть измерена тепловым методом в диапазоне давлений от 1 до 10 мм рт. ст. Суть метода состоит в измерении электрической мощности, необходимой для поддержания постоянной температуры тонкой платиновой проволоки, находящейся в цилиндрической ячейке, которая содержит образец газа. Непрерывное поддержание температурного баланса реализуется с помощью мостовой схемы, построенной на базе операционного усилителя и имеющей на выходе силовой транзистор. Условия постоянства температуры проволоки реализуются при величине давления в ячейке ниже 20 мм рт. ст. независимо от типа газа, заполняющего ячейку. В цепь включен потенциометр, позволяющий регулировать температуру проволоки для корректировки чувствительности устройства в заданном диапазоне давлений. Если в сосуде находится газ, электрическая мощность $P = I_{\omega}^2 R_{\omega}$, требуемая для поддержания постоянной температуры платиновой проволоки, расходуется на отвод тепла газом и излучение и отведение тепла по проволоке. Чтобы исключить потери на конвекцию, измерения проводятся при постоянно низких давлениях (от 1 до 10 мм рт. ст.). Потери мощности на излучение и процесс теплопроводности вдоль проволоки P_e могут быть определены при откачке газа из ячейки до величины давления 10^{-3} мм рт.ст. измерением величины электрической мощности $P_e = I_{\omega L}^2 R_{\omega}$. Мощность, затраченная на отвод тепла газом, затем находится как разность $P_c = P - P_e = (I_{\omega}^2 - I_{\omega L}^2) R_{\omega}$. Измерения P_c как функции давления f проводились для He, воздуха и CO₂. Величина f измерялась манометром Мак-Леода, величина тока в проволоке — измерителем тока. Для диапазона давлений f от 1 до 10 мм рт.ст. величина P_c дается формулой $1/P_c = 1/P_{\infty} + B/f$, где B - коэффициент accommodation, зависящий от температуры проволоки T_{ω} и комнатной температуры T_0 , а P_{∞} связана с длиной проволоки l , ее радиусом r_1 , радиусом цилиндрической ячейки r_2 соотношением $P_{\infty} = [2\pi l(T_{\omega} - T_c)\lambda_m r_1]/r_2$ (см. Kennard E.H. Kinetic Theory of Gases, Mc Graw-Hill, New York, 1953, 311-315). Экспериментально полу-

ченные значения удельной теплопроводности λ_m сравнивались с расчетными. Отмечается, что описанные измерения должны проводиться группой студентов.

Измерение теплопроводности воздуха при разных давлениях. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Москва. Наука. 1983. Работа 3.3. С. 181-190.

Измерительный прибор представляет собой стеклянный баллон с водяной рубашкой, которая служит для увеличения тепловой инерции прибора. Накаливаемая электрическим током нить натянута по оси цилиндра. Опыт проводится с воздухом. Внутренняя полость прибора соединена с вакуумным насосом. Давление воздуха в приборе измеряется стрелочным манометром при достаточно больших давлениях и термомпарным манометром при низких давлениях. Температура нити определяется по ее сопротивлению. Теоретический анализ потока тепла от нити радиуса r к цилиндру радиуса R , на оси которого расположена нить, приводит к соотношению

$$\frac{T_n - T_{ц}}{Q} = \frac{1}{2\pi L \lambda} \ln \frac{R}{r} + \frac{B}{P},$$

где T_n – температура нити, $T_{ц}$ – температура цилиндра, Q – поток тепла от нити к цилиндру, L – длина цилиндра, λ – теплопроводность воздуха, P – давление воздуха, B – некоторый коэффициент. В написанное выше соотношение кроме B и λ входят только величины, которые можно непосредственно измерить на опыте. Члены, содержащие λ и B , можно разделить экспериментально. Для этого нужно производить измерения при разных P . Результаты опыта изображаются на графике, на котором по оси абсцисс откладывается $1/P$, а по оси ординат $(T_n - T_{ц})/Q$. Точки должны ложиться на прямую, наклон которой определяет B . Прямая отсекает на оси ординат отрезок, равный первому члену правой части написанного выше соотношения. Из него нетрудно найти λ .

Определение теплопроводности газов при атмосферном давлении. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Москва. Наука. 1983. Работа 3.4. С. 190-194.

Тонкая никелевая проволока натянута по оси длинной вертикально стоящей медной трубки. Через штуцер трубка наполняется исследуемым газом. Проволока нагревается электрическим током; ее температура T_1 определяется по изменению электрического сопротивления. Трубка находится в кожухе, через который пропускается вода из термостата. Температура воды T_2 измеряется термометром, помещенным в термостат. Количество теплоты Q , протекающей через газ, равно количеству теплоты, выделяемому током в проволоке, и может быть найдено по закону Джоуля-Ленца. Теплопроводность воздуха вычисляется по формуле

$$\lambda = \frac{Q}{T_1 - T_2} \frac{1}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r_1},$$

где L – длина проволоки (и цилиндра), r_1 и r_2 – радиусы проволоки и цилиндра соответственно.

Изучение зависимости коэффициента теплопередачи в водороде от давления. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. *Общий физический практикум. Молекулярная физика.* М. **1988, 1999.** Лаб. работа 5.2. С. 130-136.

Основным элементом экспериментальной установки является стеклянный цилиндрический баллон, в котором расположена V-образная металлическая нить. Концы нити прикреплены к металлическим держателям, которые имеют электрические выводы из баллона. Нагрев нити ведется электрическим током. Теплопередача осуществляется между нагреваемой нитью и стенками баллона, имеющими температуру окружающего воздуха. Температура нити измеряется термопарой. Воздух из баллона откачан, и вся система герметизирована. Газообразный водород в баллоне появляется при нагревании твердого соединения водорода (гидрата окиси титана). В ходе выполнения работы предварительно измеряется поток энергии за счет теплоизлучения и теплопроводности держателей, а затем измеряется зависимость коэффициента теплопередачи водорода от давления.

Экспериментальная установка для исследования переноса тепла посредством теплового излучения, теплопроводности и конвекции. Eine versuchs-anordnung zur untersuchung des wärmetransports durch wärmestrahlung, wärmeleitung und convection. Zimmermann Uwe. *Phys. Und Didakt.* – **1990.** – 18, №4 – с. 320-329. [РЖ 1991 10A111]

Описывается установка, позволяющая провести следующие исследования: зависимость переноса тепла путем теплового излучения от температуры, определение постоянной Стефана-Больцмана, зависимость переноса тепла в газе от давления и температуры и определение теплопроводности газов. Установка состоит из стеклянной колбы, содержащей электрически подогреваемый медный цилиндр (излучающее тело) и соединенный с манометром, вакуумным насосом и трубкой для впуска газа. Излучающее тело покрыто специальным черным лаком. Колба имеет впаянные в нее подсоединения для нагрева излучающего тела, для измерения силы тока и напряжения на сопротивлении нагревающего элемента и для определения температуры излучающего тела с помощью термопары.

Лабораторная работа по визуализации воздушных потоков с помощью голографической интерферометрии. Laboratory studies of air flow visualization using holographic interferometry. Peiponen K.E., Hamalainen R.M.K., Asakura T. *Amer. J. Phys.* **1991.** 59. № 6. С. 541-544. [РЖФиз. 1992-7A81].

Описана лабораторная установка для получения голограмм воздушного потока и методика количественного анализа голографических интерферограмм, основанная на зависимости показателя преломления воздуха от давления и температуры. Продемонстрированы возможности визуализации процесса теплообмена между потоком воздуха и стенками сосуда, наблюдения турбулентности потока, а также деформации прозрачных тел.

Заключение на цикл работ В.Ф. Яковлева по природе стационарных градиентов температур. Заев Н.Е. *Ж. Рус. физ. мысли.* **1993.** № 1-6. С. 52-53. [РЖФиз. 1994 3A93].

В эксперименте В.Ф. Яковлева, И.П. Лаврентьева, Н.П. Сахарова получены достоверные результаты о градиенте температуры во вращающемся газе

в роторе центрифуги, где установлено приемлемое совпадение расчета с опытом. Этот эксперимент дает полное основание считать, что Максвелл прав: градиент температуры в атмосфере Земли обусловлен ее гравитационным полем.

Просто физика. Каганов М. Квант. 1998. № 4. 10-16. [РЖ 1999 04A72].

Статья ставит целью пробудить и укрепить интерес читателей к физике, объясняющей бесконечное число явлений, с которыми нас сталкивает повседневная жизнь. Рассматривается механизм переноса тепла.

Студенческий эксперимент по распространению тепловых волн. An undergraduate experiment on the propagation of thermal waves. Bodas A., Gandia V., Lopez-Baeza E. *Amer. J. Phys.* 1998. 66, № 6, 528-533. [РЖ 1999 03A142].

Дифракционный калориметр теплового потока в физическом практикуме. Булкин П.С., Захарцов В.М. *Учеб. физ. эксперим. в высшей школе.* 1998. № 2. 31-39. [РЖ 00.03 18A.121].

Описан учебный макет дифференциального калориметра теплового потока. Обсуждается его применение в физическом практикуме для измерений теплоемкости и теплоты кристаллизации.

6. Изучение явлений переноса в воздухе. П.С. Булкин, И.И. Попова. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Изд. моск. ун-та. 1999. Лаб. работа 5.4. С. 141-146.

Для измерения коэффициента теплопроводности используется метод цилиндрического слоя. По оси измерительной стеклянной трубки натянута тонкая металлическая проволока, по которой пропускается постоянный ток. Температура проволоки определяется по ее электрическому сопротивлению. По результатам измерений определяется величина коэффициента теплопроводности воздуха при разных давлениях газа.

Коэффициент внутреннего трения газа определяется при его пропускании через измерительный капилляр. Скорость воздуха, проходящего через капилляр, измеряется реометром, представляющим собой вертикальную коническую трубку, в которую помещен легкий шарик. Поток воздуха, проходящий снизу вверх, поднимает шарик на тем большую высоту, чем выше скорость потока. Оценивается величина числа Рейнольдса.

Двигатель Стирлинга. Le moteur Stirling. Genevois D. *Bull Union phys.* 2002. 95, № 832. 551-558. [РЖ 04.04-18A.150].

Обсуждается как с минимальным оборудованием и наименьшими затратами изготовить двигатель Стирлинга, который даёт возможность оригинальным способом и весьма убедительно проиллюстрировать законы превращения энергии и термодинамику. Приведена принципиальная схема двигателя и дан перечень необходимых материалов.

Наблюдение бифуркационного перехода в конвективном потоке воздуха. Трусевич А.Н., Пятаков А.П. *Физ. образ. в вузах.* 2003. 9, № 2, 96-102, 127-128. [РЖ 04.02.-18A.158].

Предполагается простой эксперимент, позволяющий методом измерения горизонтального распределения температур на различных высотах над источником тепла (электрической плиткой) наблюдать сложный эффект нелинейной неравновесной термодинамики – организацию потока нагретого воздуха в две различные пространственные структуры, разделённые областью неустойчивого состояния, соответствующей точке бифуркации.

Вводный анализ конвекции Benard-Marangoni. Introductory analysis of Benard-Marangoni convection. Marofo J.A., Perez-Munuzuri V., Romero-Cano M.S. *Eur. J. Phys.* **2007.** 28, № 2.311-320. [РЖ 08.10-18A.110].

Исследование конвективной теплопередачи с помощью железа и фена. Investigating convective heat transfer with an iron and a hair-dryer. Ganzalez Manuel J., Lucio Jesus M. *Eur. J. Phys.* **2008.** 29, № 2. 263-273. [РЖ 08.11-18A.109].

Эксперимент по динамике тепловой диффузии. An experiment on the dynamics of thermal diffusion. Sullivan M.C., Thompson B.G., Williamson A.P. *Amer. J. Phys.* **2008.** 76, № 7. 637-642. [РЖ 09.05-18A.66].

3.3.2. Теплопроводность твердых тел

Определение коэффициента теплопроводности металлов методом стационарного теплового состояния длинного стержня. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Том второй. Молекулярные и тепловые явления. Электричество и магнетизм. Оптика и строение атома. К. П. Яковлев. Работа 25 в. М.-Л. **1949.** С. 48.

Данный метод определения коэффициентов теплопроводности металлов основан на исследовании распределения температур при стационарном тепловом состоянии в длинном цилиндрическом стержне, один конец которого нагревается до некоторой температуры, а другой имеет температуру окружающего пространства. При этом предполагается, во-первых, что стержень имеет очень малое поперечное сечение, так что температуру во всех точках любого сечения стержня, не исключая и точек, лежащих на его поверхности, можно считать постоянной, и, во-вторых, что стержень имеет настолько большую длину, что практически ее можно считать бесконечно большой. Решая при таких условиях задачу теплопроводности стержня, получаем следующую формулу для коэффициента теплопроводности его материала:

$$k = \frac{q_1}{aS(t_1 - t_0)},$$

где q_1 – количество теплоты, которое стержень получает через нагреваемый конец, a – величина, определяемая из углового коэффициента зависимости натурального логарифма отношения $(t_1 - t_0)/(t_x - t_0)$ от координаты x точки стержня, в которой измеряется температура t_x ; t_1 – температура нагретого конца стержня, t_0 – температура окружающего пространства; S – площадь поперечного сечения стержня.

Определение коэффициента теплопроводности металлов. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред проф. В.И. Ивероновой. Составлено: А.Г. Белянкиным, Е.С. Четвериковой, И. А. Яковлевым. М.-Л. 1951. Задача 23. С. 131-135. 1962. Задача 29. С. 153-157. 1967. Задача 43. С.213-217.

Определяется теплопроводность латунного стержня, нагревание конца которого производится в электропечи. Величина коэффициента теплопроводности латуни вычисляется по формуле

$$\lambda = \frac{x}{S(T_1 - T_0) \ln \frac{T_1 - T_0}{T - T_0}},$$

где x – расстояние от нагреваемого конца стержня, где температура T_1 , до точки стержня, где температура T ; S – площадь поперечного сечения стержня, T_0 – температура окружающей среды.

Измерение теплопроводности металлов (лабораторная работа для физического практикума). Черпаков В.П. “Уч. зап. Великолукск. гос. пед. ин-та”, 1961, вып. 16, 97-100. [РЖФиз. 1963 1A107].

Прибор для измерения теплопроводности металлов состоит из медного, алюминиевого, латунного и железного стержней (длиной 25 см, диаметром 4-8 мм), смонтированных концами в нагревательные коробки, имеющие картонные теплоизолирующие накладки и патрубки для подвода и отвода тепла. Температуры в средних точках стержней измеряются термометрами. Приводятся теория метода, вывод расчетной формулы и порядок выполнения работы.

Определение коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции. Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. М., 1962. Задача 38. С. 186-190. 1967. Задача 45. с. 222-226.

Количество тепла, передаваемого конвекцией с единицы поверхности тела, нагретого до температуры T_1 , в единицу времени окружающей среде температуры T_2 , можно выразить в виде $Q_k = \alpha_k (T_1 - T_2)$, где α_k – коэффициент теплоотдачи. Он является сложной функцией параметров среды (ее вязкости, плотности, теплоемкости т. п.), формы тела, а также функцией температуры. Основным элементом установки является горизонтально расположенная медная трубка, внутри которой по оси натянута нихромовая проволока, служащая нагревателем – по ней пропускается электрический ток. Медная трубка нагревается и отдает тепло окружающему ее воздуху. Для измерения температуры наружной поверхности трубки на ней, на равных расстояниях друг от друга, укреплены семь термометров (медь-константан). По прошествии некоторого времени после включения установки показания всех термометров перестанут изменяться. Это будет означать, что количество теплоты, получаемой трубкой от нагревателя, равно количеству теплоты, отдаваемой трубкой в воздух, т. е. процесс стал установившимся. Коэффициент конвекционной теплоотдачи вычисляется по формуле

$$\alpha_k = \frac{d}{\lambda} A [224(T_1 - T_2)]^n,$$

где d – внешний диаметр трубки, λ – коэффициент теплопроводности воздуха, A и n – величины, определяемые при промежуточной обработке результатов эксперимента.

Определение коэффициента теплопроводности (сравнительный метод). Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред проф. В.И. Ивероновой. Сост.: А.Г. Белянкиным, Г.П. Мотулевич, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. Москва. 1962. Задача 28. С. 150-153. 1967. Задача 42. С. 209-212.

Из опыта известно, что количество тепла dQ , которое проходит вследствие теплопроводности через слой толщины dx , площади S при разности температур на границах слоя dt , пропорционально градиенту температуры dt/dx , площади S и времени $d\tau$:

$$dQ = -\lambda S \left(\frac{dt}{dx} \right) d\tau,$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала рассматриваемого слоя. В настоящей задаче рассматривается прохождение тепла через трехслойную пластинку, коэффициент теплопроводности среднего слоя которой λ_2 известен. Коэффициенты теплопроводности других слоев вычисляются по формулам

$$\lambda_1 = \lambda_2 \frac{a_1 n_3 - n_2}{a_2 n_2 - n_1}, \quad \lambda_3 = \lambda_2 \frac{a_3 n_3 - n_2}{a_2 n_4 - n_1},$$

где a_i – толщины слоев, n_i – показания гальванометров, подключенных к терморам, головки которых помещены на границах слоев.

Температурные волны и метод Ангстрема. Bryant Howard C. Heatwaves and Angstrom's method. "Amer. J. Phys.", 1963, 31, № 5, 325-327. [РЖФиз. 1964 1A82].

Описана установка для измерения температуропроводности металлов, предназначенная для студенческого практикума.

Определение коэффициента теплопроводности твердых тел по методу Христиансена. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Сост.: Л.Л. Гольдиным, С. М. Козеллом, Н.Н. Колачевским и др. Изд. "Наука". 1964. Работа 24. С. 147-150.

Прибор Христиансена представляет собой систему из нагревателя, имеющего температуру T_1 , и холодильника, имеющего температуру T_2 ; температуры эти поддерживаются постоянными. Тепловой поток от нагревателя к холодильнику протекает через зажатые между ними пластинки из исследуемого и эталонного материалов. Коэффициенты теплопроводности исследуемого σ_1 и эталонного σ_2 материалов связаны соотношением

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{d_1 \Delta T_2}{d_2 \Delta T_1},$$

где d_1 и d_2 толщины исследуемой и эталонной пластинок соответственно, ΔT_1 и ΔT_2 – перепады температур на пластинках, измеряемые с помощью терморам.

Опыт Ангстрема (по определению коэффициента температуропроводности). VcNeill D. J. Angstrom's experim ent. “*Amer. J. Phys.*”, 1964, 32, № 8, 642-643. [РЖФиз. 1965 2A74].

Установка состоит из кристаллического диода, к которому припаян длинный и тонкий медный штырь с одной стороны и толстый медный брусок (тепловой резервуар) с другой. Вдоль медного штыря на равных расстояниях припаяны константановые отводы, которые образуют “горячие” спаи термопар “медь-константан”. Если через кристаллический диод пропускать переменный ток в разных направлениях, то он будет, соответственно, выделять или поглощать тепло. Вдоль медного штыря будет распространяться температурная волна

$$T(z, t) = \sum C_n \exp(-a_n z) \cdot \sin(n\omega t - b_n z),$$

которую можно измерить с помощью термопар. Гармонический анализ снятой кривой дает амплитуду a_1 и фазу b_1 первой гармоники. Коэффициент температуропроводности равен $D = \omega/2a_1b_1$.

Определение коэффициента теплопроводности (сравнительный метод). Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. М., 1967. Задача 42. С. 209-212.

Три слоя исследуемых веществ плотно зажимаются между двумя одинаковыми медными бачками, из которых нижний охлаждается проточной водой, а верхний нагревается водой, подаваемой из термостата. Для измерения температуры используются четыре одинаковые термопары, горячие спаи которых помещаются между кружками исследуемых веществ по возможности ближе к центру, а холодные спаи погружены в бачок с маслом, охлаждаемый проточной водой. При всех измерениях меняется только средний кружок, а верхний и нижний всегда ставятся резиновые, так как только резина может дать соприкосновение по всей поверхности, несмотря на вложенную термопару. Коэффициенты теплопроводности материалов верхнего λ_1 и нижнего λ_3 кружков вычисляются по формулам:

$$\lambda_1 = \lambda_2 \frac{a_1 n_3 - n_2}{a_2 n_2 - n_1}, \quad \lambda_3 = \lambda_2 \frac{a_1 n_3 - n_2}{a_2 n_4 - n_1},$$

где λ_2 и – теплопроводность среднего кружка (эбонит), λ_1 и λ_3 – теплопроводность резины в двух слоях при разных температурах, n_i – показания термопар.

Лабораторные работы по электро моделированию нестационарных температурных полей. Тодес О.М., Кнодель Г.А. “Сб. науч.-метод. статей по физ. М-во высш. и средн. спец. образования СССР”, 1972, вып. 2. 47-50. [РЖ 1972 8A56].

Приводится подробное описание лабораторной работы, в которой ставится задача моделирования распространения в безграничном грунте тепловых волн, вызванных периодическими годовыми или суточными колебаниями температуры поверхности.

Лабораторные работы по исследованию температурных полей на участке неоднородного ограждения методом электротеплового моделирования. Кнодель Г.А., Сиворцов В.П., Смирнов К.Ф., Петренко И.И., Годес О.М. “Сб. науч.-метод. статей по физ. М-во высш. и средн. спец. образования СССР”, 1972, вып. 2, 85-88. [РЖ 1972 8А56].

Кратко описаны некоторые учебные опыты по электротепловому моделированию стационарных полей, которое производится на плоских двумерных моделях из электропроводящей бумаги, имитирующих горизонтальное сечение вертикального ограждения. Приведена схема установки одной из таких работ.

Определение коэффициента теплопроводности твердых тел. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Изд. 2-е. “Наука”. 1973. Работа 23. С. 159-162.

Определение коэффициента теплопроводности неметаллических тел. Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Под ред. А.П. Максименко. Днепропетровский. гос. ун-т. 1973. Работа № 1-18. С. 115-118.

Определение коэффициента теплопроводности твердых тел сравнительным методом. Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. Красникова В.И. и доц. Узикова А. Н. М., 1975. Лаб. работа № 17. С. 191-107.

Определение коэффициента теплопроводности твердых тел методом теплового импульса. Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. Красникова В.И. и доц. Узикова А.Н. М., 1975. Лаб. работа № 19. С. 204-212.

Новый вариант аппарата Сирля. Lorrimer J.E., Mc Mullan J.T., Walmsleg D.G. Searle’s apparatus revisited. “*Phys. Education*”. 1976, 11, № 1, 42-44. [РЖ 1976 7А 119].

В традиционном варианте аппарата Сирля, служащего для лабораторных измерений теплопроводности металлов и сплавов, стержень диаметром 25 мм и длиной 300 мм нагревается с одной стороны водяным паром и охлаждается с другой стороны проточной водой. Для измерения перехода температуры в двух местах стержня просверливались отверстия диаметром ~ 4 мм, в которые вставлялись термометры. Количество прошедшего через стержень тепла измерялось по расходу и перепаду температуры охлаждающей воды. В новом варианте температура в разных сечениях стержня (диаметр 6,35 мм, длина 75 мм) измеряется термопарами, а количество тепла – по мощности, потребляемой миниатюрным электрическим нагревателем, помещенным в отверстие на одном конце стержня. Другой конец плотно вставлен в отверстие в медном блоке, охлаждаемом водой. Все устройство помещено в деревянный ящик размером $150 \times 80 \times 80$ мм³, заполненный полистиролом. Небольшая мощность нагревателя (несколько ватт) позволяет работать от батареи. Малый размер стержня приводит к значительному сокращению времени измерения (15 минут вместо 1 часа), что позволяет учаще-

муся за время лабораторной работы провести измерения с несколькими образцами.

Исследование термических эффектов, возникающих при упругих деформациях. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Москва. Наука. 1983. Работа 3.13. С. 244-251.

Лабораторная работа по изучению теплоотдачи и теплопроводности твердых тел (металлов). Магидсон И.А., Алексеев В.А., Поликарпов Ф.И. “Сб. научн.-метод. ст. по физ.” (Москва), 1987. № 13, 94-99. [РЖ 1987 1A126]

Описывается метод и простая установка для лабораторной работы по определению коэффициента теплоотдачи и теплопроводности металлов.

Лабораторные работы по кристаллофизике с использованием древесины. Перпальскис Б.Ш., Кучин С.В., Михайличенко А.П., Ларин В.Л., Сотиряди Г.Н., Островский В.А. “Изв. вузов. Физ.” 1987. 30, № 8. С. 99-102. [РЖ 1987 1A127]

С помощью метода, описываемого в (Изв. вузов. Физика 1985, № 6, 104), исследуется зависимость диэлектрической проницаемости от направления, зависимость удельного сопротивления от ориентации пластинок, зависимость показателя преломления от напряжения. Методом Сенармона исследуется анизотропия теплопроводности древесины. Рассматривается также анизотропия упругого модуля для древесины.

Определение коэффициента температуропроводности твердого тела. П.С. Булкин. Под ред А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988. Лаб. работа 5.3. С. 137-141. 1999. Лаб. работа 5.3. С. 137-141.

Твердое тело в виде цилиндрического блока из оргстекла зажимается между двумя термостатирующими резервуарами. Верхний резервуар нагрет протекающей через него термостатирующей жидкостью (водой) при температуре около 50° С. Через нижний резервуар продувается воздух при комнатной температуре. Термопары, используемые в эксперименте, подсоединены к самописцу. Коэффициент температуропроводности цилиндрического блока определяется методом измерения разности температур его торцов и его центральной части в процессе установления теплового режима.

Исследование теплопроводности металлов и почв. Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика. Саратовский с/х ин-т им. С.И. Вавилова. 1989. 98 с. (с. 68).

Измерение теплопроводности и теплоемкости в лабораторных работах по курсу общей физики. Measurement of thermal conductivity and heat capacity in an undergraduate physics laboratory. Talpe J.H., Bekeris V.I., Acha C.E. *Amer.J.Phys.* – 1990.-58, №4. С. 379-381. [РЖ 1990 12A146]

Описывается лабораторный эксперимент по измерению коэффициента теплопроводности цилиндрического образца, зажато между нагревателем и хо-

лодильником, по информации распределения температуры вдоль оси системы. При этом поток тепла через боковые поверхности считается пренебрежимо малым. Измерение температуры осуществляется при помещении диодного термометра на диоде I№914 с чувствительностью 2.68 мВ/К при токе возбуждения 10 мкА . В качестве образцов используется асфальт, предварительно расплавленный и сформированный специально для эксперимента. По данным распределения температуры определяется постоянная времени и затем коэффициент теплопроводности.

Компьютеризированная лабораторная установка для измерений коэффициента теплопроводности. Skomputeryzowane stanowisko do pomiaru przewodnictwa cieplnego dla Pracowni Fizycznej I. Szydłowski H., Smuszkiewicz R. Post. Fiz. **1991**. 42, № 3. С. 335-341. [РЖФиз. 1992-9А93].

Описывается специально сконструированная для студенческого лабораторного практикума установка для определения коэффициента теплопроводности. Установка сопряжена с микро-ЭВМ типа СРС 464 (Шнайдер) и имеет выход на принтер и дисплей. Объектом измерения является металлический стержень с теплоизолированной боковой поверхностью, торцы которого при помощи нагревателя и термостата поддерживаются при постоянных температурах. Распространение температур вдоль стержня контролируется при помощи термопар, сопряженных с компьютером. Установка позволяет находить теплопроводность по двум методам: постоянного теплового потока и по методу тепловых волн Ангстрема при работе нагревателя в импульсном режиме.

Удобный метод измерения теплопроводности биологических тканей. A convenient method of measuring the thermal conductivity of biological tissue /Liang X.G., Ge X.S., Zhang Y.P., Wang G.J. //Phys. Med. And Biol. – **1991** – 36, №12. – с.1599-1605. [РЖ 1992 8А182].

Описан основной принцип работы датчика теплопроводности. На основе этого принципа разработан тонкий датчик, воспроизводительность данных которого не хуже $94,7\%$, а относительная ошибка измерения $<6,0\%$. Каждое измерение может быть проведено за 90 с . Увеличение температуры может контролироваться с точностью до 2°C . С помощью датчика измерена теплопроводность свиного сала, мяса, печени, почек, а также тканей живой и мертвой змеи. Обнаружено, что содержание воды играет важную роль в определении теплопроводности биологических тканей. Датчик может использоваться в диапазоне температуры от -40 до $+150^\circ\text{C}$.

Лабораторный эксперимент по измерению коэффициента теплопроводности свободной конвекции металлической пластины. A laboratory experiment for measuring the free convection heat transfer coefficient of a plane metal plate. Roldan C., Buendia M., Cibrian R., Salvador R., Ramon E., Herraiz J., Belda R., Dolz M. *Eur. J. Phys.* **1993**. 14, № 3. С. 128-131. [РЖФиз. 1993-11А139].

Метод определения термического сопротивления контакта двух тел. Ю.П. Мордвинов, А.Д. Лобанов. *Физ. образ. вузах.* **2001**. Т. 7. № 4. С. 82-86.

Приводится метод определения термического сопротивления контакта двух тел с использованием экспериментальных данных, полученных при тепло-

передаче от одного тела к другому. Метод может быть использован для создания лабораторных установок при обучении основам теплопередачи, а также в технических целях.

Определение отношения коэффициентов теплопроводности и электропроводности методом Кольрауша. В.С. Булыгин. МФТИ, Физ. образ. в вузах. **2004.** Т. 10. № 4. С. 75-80.

Получено выражение, позволяющее определять отношение постоянной Больцмана k и элементарного заряда e в эксперименте по стационарному нагреву проволоки постоянным электрическим током.

Экспериментальный компьютеризированный комплекс для изучения теплопроводности. В.Е. Иванов, В.В. Васильев. Физ. образ. в вузах. **2005.** Т. 11. №. 2. С. 66-74.

Разработана методика изучения процесса распространения тепла в металлическом стержне. Предложен экспериментальный метод. Решения уравнения линейной теплопроводности при заданных начальных и краевых условиях. Получены графики зависимости температуры стержня от координаты для различных моментов времени после начала эксперимента. Описаны методы обработки экспериментальных данных с помощью современных математических пакетов.

Автоматизированная лабораторная работа “Определение коэффициента температуропроводности твердого тела”. Боков П.Ю., Булкин П.С., Иванцов А.А., Митин И.В., Салецкий А. МС., Червяков А. В. ФССО-07. Материалы IX Межд. конф. С.-Петербург. **2007.** С. 45-47.

Определение коэффициента температуропроводности веществ основано на применении одномерной модели процесса переноса тепла в твердом теле. В ходе работы изучается явление переноса тепла в твердом теле при заданных начальных и граничных условиях. Коэффициент температуропроводности веществ определяется по временной зависимости температуры в геометрическом центре образца, расположенного между нагревателем и холодильником, в процессе установления стационарного теплового потока через него.

3.3.3. Теплопроводность жидкостей

Определение относительной теплопроводности жидкостей методом жидкой пленки. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Том второй. Молекулярные и тепловые явления. Электричество и магнетизм. Оптика и строение атома. К. П. Яковлев. Работа 25 а. М.-Л. **1949.** С. 45.

В методе жидкой пленки измеряется теплопроводность очень тонкого слоя жидкости, или *жидкой пленки*, которая вводится между двумя параллельными металлическими пластинками, установленными горизонтально. Нагревание жидкого слоя производят сверху, удерживая верхнюю пластину при постоянной температуре, более высокой, чем температура нижней пластины. При таких условиях в жидком слое через некоторое время устанавливается стационарное тепловое состояние, причем конвекционные токи в нем не образуются, и вся пере-

дача тепла между пластинами обуславливается исключительно теплопроводностью жидкости.

Прибор, применяемый в данной работе, состоит из трех круглых пластин красной меди толщиной около 1 см; их диаметр равен приблизительно 10 см. Нижняя пластинка устанавливается на металлический сосуд, через который протекает холодная вода постоянной температуры. На верхнюю пластинку помещают электрический нагреватель, температура которого поддерживается также постоянной. Исследуемые жидкости вводятся в пространства между пластинами, где они удерживаются капиллярными силами. Вследствие теплопроводности жидкостей в системе происходит тепловой обмен, и по истечении некоторого времени в ней устанавливается стационарное состояние, при котором температуры всех трех пластин оказываются постоянными. Решением уравнения теплопроводности для рассматриваемой системы получено соотношение

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{d_1}{d_2} \frac{t'_1 - t'_2}{t_1 - t_2},$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты теплопроводности двух слоев жидкости толщинами d_1 и d_2 соответственно, $t'_1 - t'_2$ – разность температур поверхностей слоя жидкости толщиной d_1 , $t_1 - t_2$ – разность температур поверхностей слоя жидкости толщиной d_2 .

Таким образом, определив толщину жидких слоев и измерив температуру всех трех пластин после достижения системой стационарного теплового состояния, можно определить отношение коэффициентов теплопроводности обеих жидкостей, а если известна абсолютная величина одного из них, также найти величину другого.

Об измерении в практикуме коэффициентов тепло- и массопереноса.

Sur une mesure en laboratoire de travaux pratiques de diffusivites thermique et massique. Guyon E., Jenffer P., D'Arco A., Cloitre M. "Eur. J. Phys." **1981**, 2, № 4. С 193-199. [РЖ 1981 10А76]

Разработана установка по измерению коэффициентов температуропроводности и диффузии вещества в жидкости оптическим методом. Излучение лампы-вспышки, пройдя через сетку и формирующий изображение объектив, создает в объеме кюветы модулированное распределение температуры или концентрации продукта фотоллиза. Эволюция этой структуры во времени вследствие процессов термодиффузии или массопереноса регистрируется с помощью считывающего луча лазера. Сигнал дифрагированного лазерного излучения подается на запоминающий осциллограф. Расплывание температурной или концентрационной "сетки" в жидкости позволяет легко оценить соответствующий коэффициент диффузии.

Модель остывающего водоема. Pond cooling pattern. Wright H. С. *Phys. Educ.* **1992**, 27, № 4. С. 229-230. [РЖФиз. 1993-3А115].

Рассмотрена модель остывающего водоема с вертикальными стенками. Отвод тепла осуществляется только через его поверхность. Считается, что вначале охлаждается тонкий поверхностный слой воды. В результате его плотность

увеличивается и слой опускается, а на его место поднимается более высокотемпературный (все температуры в этой задаче выше $+4^{\circ}\text{C}$). В рамках такой модели найдена формула для расчета времени, через которое температура на заданной глубине понизится от начальной θ_i до некоторой θ . Приведены также результаты экспериментов по динамике охлаждения воды в сосуде. Обнаружено согласие экспериментальных результатов и предсказаний теории. Описанная задача проста, поучительна и не имеет аналогов в литературе.

Эксперименты по термомагнитной конвекции в условиях микрогравитации. Mikrogravitationsexperimente zur thermomagnetischen Konvektion. Odenbaeb S. *Phys. Bl.* **1994.** 50, № 4. С. 350-352. [РЖФиз. 1994-9А104].

В суспензиях магнитных частиц, находящихся под воздействием магнитного поля, термическая конвекция может порождаться и в отсутствие силы тяжести. Описана разработанная в Институте материаловедения при Мюнхенском университете конвекционная камера и эксперименты, проведенные с ней в т. н. Бременской башне, где временное (4,5 с) состояние невесомости создается в результате свободного падения экспериментального оборудования в вакууме.

Изучение термоконвекции в ячейке Хеле-Шоу. Аржанин А.Р. 5 *Общероссийская межвуз. конф. студ., аспирантов и молодых ученых “Наука и образование”*, Томск, 23-26 апр., **2001**. Т. 1. Естеств. и точные науки. Мурманск, 2003. 15-17. [РЖФиз. 04.05-18А.168].

Ячейка Хеле-Шоу – это параллелепипед, один из горизонтальных размеров которого много меньше двух других. Она является простым и наглядным примером периодических автоколебаний в замкнутых двумерных течениях. Периодические колебания в ячейке можно наблюдать при термоконвекции в жидкостях при подогреве снизу. Авторами создана лабораторная установка для наблюдения последовательной смены бифуркаций при увеличении числа Рэлея. Эта работа может быть включена в лабораторный практикум по курсу естествознания при изучении явлений самоорганизации.

Лабораторная работа “Измерение коэффициента теплопроводности жидкости”. Аржанин А.Р. 5 *Общероссийская межвузовская конференция студентов, аспирантов и молодых учёных “Наука и образование”*. Томск, 23-26 апреля, **2001**. Т.1. Естественные и точные науки. Мурманск, **2003**. 17-19. [РЖ 04.05.-18А.167].

Для измерения коэффициента теплопроводности авторы использовали метод стационарного потока. Дано описание прибора для измерения коэффициента теплопроводности.

Глава 4

БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Изучение молекулярно-кинетических явлений из наблюдений броуновского движения. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 22 в. М.-Л. 1949. С. 22.

В данной работе броуновское движение наблюдается на препаратах гуммигута, желтой растительной краски, которая в водных эмульсиях образует взвешенные частички различного размера, в среднем около 1 мкм в диаметре. При наблюдении частичек такого размера приходится пользоваться очень большим увеличением, которое дает так называемый *ультрамикроскоп*, имеющий *параболоид-конденсор* и *иммерсионную систему*. Установка позволяет фиксировать траектории частиц путем нанесения на бумаге точек, соответствующих их положению через определенные промежутки времени. Закон Эйнштейна записывается в виде $x^2 = (kT/3\pi\eta r)t$, где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, η – коэффициент вязкости среды, в которой наблюдается движение частиц, r – радиус броуновских частиц, t – время наблюдения их движения. Если найти величину x^2 , т. е. среднюю квадратичную проекции перемещения броуновской частицы на какую-либо ось за определенный промежуток времени t , то можно затем вычислить радиус частицы r .

Изучение законов броуновского движения и определение размеров взвешенных частиц. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. 1951. Задача 33. С. 175-182. 1953. Задача 33. С. 177-184. 1955. Задача 33. С. 177-184.

Основной целью работы является проверка пропорциональности между средним квадратичным перемещением и промежутком времени наблюдения, а также определение размеров броуновской частицы. Основным элементом установки является объект исследования – препарат, представляющий собой 3-4 капли суспензии гуммигута, внесенные при помощи пипетки в углубление (лунку) предметного стекла микроскопа. Препарат накрывается сверху чистым покровным стеклом. К тубусу микроскопа прикрепляется рисовальный аппарат. Под зеркало рисовального аппарата помещают лист плотной гладкой белой бумаги. Выбрав хорошо заметную движущуюся частицу, совмещают с ее изображением (через рисовальный аппарат) острие иглы, которое нужно все время двигать вслед за частицей. Через каждые 5 секунд положение частицы накалывается на бумаге.

Изучение броуновского движения газового пузырька. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. 1962. Задача 49. С. 239-247. 1967. Задача 61. С. 288-296.

В естественных кристаллах минерала берилла встречаются жидкие включения тех растворов солей, из которых он образовался. Капельки этого раствора оказались замкнутыми в теле выросшего кристалла. Раствор этот в свою очередь расслоился на водный раствор солей и на капельки выделившейся из него углекислоты. Ввиду того, что теперь углекислота в этих капельках находится при температуре уже ниже критической, она разделяется на две фазы: жидкую и га-

зовую. Газовая фаза образует маленький пузырек, помещающийся где-либо внутри сферической капельки углекислоты. Наблюдение и количественное исследование броуновского движения пузырька и составляет предмет настоящей лабораторной работы. Размер пузырька составляет лишь несколько микрон, поэтому наблюдение его движения осуществляется с помощью микроскопа с большим увеличением.

Количественное исследование заключается в проверке соотношения Эйнштейна, связывающего средний квадрат смещения частицы с протекшим промежутком времени. Броуновское движение одного из пузырьков снято на киноплёнку. Таким образом, последовательные кадры киноплёнки фиксируют положение броуновской частицы (пузырька) через равные промежутки времени. Измеряя величину смещений пузырька, можно проверить закон Эйнштейна.

Изучение броуновского движения взвешенных частиц. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть II. МИФИ. Кафедра общей физики. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. 1962. Работа 11. С. 57.

Прослеживание положения частиц при броуновском движении и проверка соотношения Эйнштейна. Vlah Bogumil. Sledovani poloh castic pri Brownove pohybu a overeni Einsteinova vztahu. "Prirod. Vedy skole", 1962, 12, № 6, 453-455. [РЖФиз. 1962 11А79].

Предложен простой и оригинальный способ для отметки положения частиц при наблюдении броуновского движения. Перед окуляром микроскопа с увеличением ≈ 800 под углом 450° устанавливается зеркало размером 10×10 см² с прозрачным окошком в центре диаметром 0,5 см. На это зеркало проектируется изображение листа бумаги, лежащего рядом с микроскопом (с помощью другого зеркала размером 20×20 см², установленного параллельно первому). Таким образом, наблюдатель видит одновременно картину в поле зрения микроскопа и изображение листа бумаги. Один наблюдатель при помощи длинной иглы делает на бумаге отметки положений частицы через равные промежутки времени, а другой наблюдатель нумерует наколотые на бумаге точки. Если соединить их прямыми линиями, то получится траектория усредненного за равные промежутки времени движения частицы при броуновском движении. Если такой опыт повторить несколько раз для разных интервалов времени, то можно проверить справедливость соотношения Эйнштейна для квадрата среднего отклонения броуновской частицы: $x^2 = k\Delta t$ за интервал времени Δt , где k – коэффициент пропорциональности.

Проверка закона Эйнштейна для броуновского движения. Zouzelka Jan, Siroka Miroslava. Overeni Einsteinova zakona pro Brownuv pohyb. "Mat. and fys. sk.", 1973/1974, 4, №4, 292-297. [РЖ 1974 6А74].

Описана методика постановки опыта по наблюдению броуновского движения частиц жира в разведенном в воде молоке и проверке закона Эйнштейна (квадрат смещения частицы пропорционален времени ее движения). Изображение броуновского движения проектируется на экран или стенку. Приведены результаты проведенного опыта.

Измерение постоянной Больцмана в опытах по броуновскому движению. Bor Pal. Kovács László. A Boltzmann-féle állandó mérése transzlációs Brownmozgás alapján. “Szegedi tanár képző” főisk. tud. közl. **1974**. 2 rész. Szeged, 1974, 143-152. [РЖ1975 9А45].

Описана методика проведения лабораторного опыта по измерению постоянной Больцмана студентами физического факультета высшей школы. В работе используется формула Эйнштейна-Смолуховского, связывающая постоянную Больцмана со среднеквадратичным отклонением взвешенной частицы; упрощенный вывод формулы приводится в статье. В основу опыта положено наблюдение с помощью микроскопа с увеличением 1350 за движением жировых шариков водной суспензии молочного порошка (в 1 л воды разбавляют 1 г порошка). Суспензия впрыскивается в специально приготовленный сосуд, в котором толщина слоя суспензии под объективом не превышала 0,1 мм. В этом слое наблюдается частица, не успевшая выйти из поля зрения в течение всего времени наблюдения (30 с). За это время частица успевает заметно отклониться. Положение частицы можно определить с точностью 0,5 деления шкалы (цена одного деления $1,052 \times 10^{-4}$ см). Среднеквадратичное отклонение вычисляется как среднее арифметическое квадратов одиночных отклонений. Для наблюдений наиболее целесообразно выбрать частицу с размером в 2 деления шкалы. В результате измерений получено значение постоянной Больцмана $k = 1,525 \times 10^{-6}$ эрг/град.

Изучение броуновского движения. Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. (Учебное пособие). Одесса. **1977**. Задача 12. С. 52-56.

О броуновском движении. Seus Erwin. Zur Brownscher Bewegung. “Prax. Naturwiss. Phys”. **1978**. 27, № 5. 123-125. [РЖ 1978 11А89].

Приведена формула Эйнштейна, описывающая броуновское движение, и показано, как, изучая характеристики броуновского движения, можно определить характеристики жидкостей, движущихся в них частиц и универсальные физические постоянные. Наблюдение за броуновским движением во многом облегчается, если направить пучок света, выходящий из окуляра микроскопа с увеличением $\sim 500^*$ на плоское зеркало, на котором нанесена координатная сетка. Приведено описание оптимальной формы кюветы для исследуемой суспензии (например, молока в воде).

Экспериментальное изучение броуновского движения частицы, находящейся под воздействием линейной квазиупругой силы. Experimental study of the Brownian motion of a harmonically bound particle. Unruh Henry Jr., Maxton Patrick M., Schwartz Jonathan. “Amer. J. Phys.”. **1979**. 47, № 9. 827-828. [РЖ 1980 6А94].

Описан опыт, в котором моделируется броуновское движение. Молекулы газа имитируются шариками диаметром ~ 3 мм. Хаотическое движение “молекул” обеспечивается при помощи электромотора. Среди “молекул” есть “частицы”-шарики диаметром ~ 1 см, к которым прикреплены стальные струны, моделирующие квазиупругую силу. Регистрируя при помощи специального устройства смещение частиц через определенные промежутки времени, можно установить определенные закономерности, характерные для максимального распре-

ления скоростей частиц, а также закон распределения энергии частиц идеального газа по степеням свободы.

Изучение броуновского движения с помощью спектроскопии рассеяния света. Brownian motion by light scattering revisited. Schumacher R.T. *"Amer. J. Phys."* **1986**. 54, № 2. 137-141. [РЖ 1986 12A120].

Описана современная установка для обучения студентов основным закономерностям броуновского движения. Эксперимент основан на изучении временной зависимости интенсивности рассеянного на полистироловых шариках света. Получаемые из временных измерений результаты используются для определения константы Больцмана. Для проведения временных измерений и последующего усреднения используется система регистрации и обработки результатов на основе персонального компьютера и микрокомпьютера. Представлены элементы теории, необходимой студентам для понимания задачи и выполнения экспериментов с временным разрешением.

Броуновское движение. Лабораторный эксперимент. Brownian motion – a laboratory experiment. Kruglak H. *Phys. Educ.* **1988**. 23, № 5. С. 306-309. [РЖ 1989 3A141]

Дано описание лабораторного эксперимента по изучению броуновского движения, который проводится в третьем семестре общего курса физики университета Западного Мичигана. Экспериментальная установка состоит из черно-белой телевизионной камеры, монитора с диагональю 48 см, коллимированного источника света и микроскопа. Используется суспензия с диаметром латексных частиц 0,93; 1,10 и 1,35 мм. Каждый студент получает 100 экспериментальных точек. Обработка результатов проводится с помощью ручного калькулятора с базовой статистической программой. Приведена гистограмма частот величины перемещений броуновской частицы и другие графики, которые строят студенты. Студенты вычисляют число Авогадро на основе экспериментальных данных и сравнивают с теоретическим значением. Приведены погрешности всех измерений, проводимых в этом эксперименте.

Лабораторный эксперимент по определению константы Больцмана. Boltzmann's constant: a laboratory experiment. Kruglak Naum. *Amer. J. Phys.* - **1989**. – 57, №3.- С. 216-217. [РЖ 1990 2A98]

Описана методика и результаты лабораторного определения константы Больцмана в процессе обучения курсу общей физики. Для этого сочетания микроскопической, компьютерной и телевизионной и техники создан аппаратный комплекс, позволяющий наблюдать за броуновским движением 1,1-мкм латексных микросфер на экране телемонитора. Электронный таймер подает звуковой сигнал через определенные промежутки времени (15 и 30 с), с тем, чтобы можно было фиксировать пространственно-временные положения наблюдаемой микросферы. Далее после многократных случайных блужданий определяется среднее квадратичное смещение броунирующей частицы и по формуле Эйнштейна с учетом вязкости жидкости, ее температуры и размера частиц определяют искомую компоненту. При числе случайных блужданий от 50 до 500 ошибка определения находится в пределах от 5 до 7%. Помимо своего первоначального назначения – разнообразить процесс обучения – созданный комплекс полезен для по-

становки многочисленных задач по молекулярной динамике жидкостей и растворов.

Исследование поступательного броуновского движения методом микровидеофильма. (Лекционная демонстрация. Лабораторная работа в общем физическом практикуме). А.А. Игнатьев, В.А. Костяков, Л.В. Кузнецова. Физ. обзор. в вузах. **1999**. Т. 5. № 4. С. 154-159.

Описан метод изучения поступательного броуновского движения с помощью микровидеофильма, использованный для лекционной демонстрации и лабораторной работы в общем физическом практикуме.

Применение метода микровидеофильма для изучения поступательного броуновского движения. (Лекционная демонстрация, лабораторная работа в общем физическом практикуме). А.А. Игнатьев, В.А. Костяков, Л.В. Кузнецова. *Преп. физики в высш. шк.* **2000**. №. 18. С. 26-29.

Установка для моделирования свойств газа. Зуев П.В. Пробл. учеб. физ. эксперим. **2002** № 16. 44-45, 101. [РЖ 03.01-18А.166].

Описан прибор, состоящий из плоской катушки, намотанной по периметру прозрачной коробки, внутри которой находятся кусочки керамического магнита, обернутые алюминиевой фольгой. На катушку подают переменное напряжение и в опытах моделируют броуновское движение, давление, испарение, конденсацию, диффузию.

Зеркало вместо микроскопа. Коробкова Т.А. *Учеб. физ. эксп.: Акт. проблемы. Современ. решения. Седьмая Всеросс. конф.* Глазов. **2002**. С. 26.

Описаны физические опыты по наблюдению броуновского движения и кристаллизации, в которых плоское зеркало позволяет увидеть процессы, обычно наблюдаемые только с помощью микроскопа или проекции на большой экран.

Измерение постоянной Больцмана с помощью наблюдения броуновского движения видео-микроскопом. Measuring Boltzmann ' s constant using video microscopy of Brownian motion. Nakroshis P., Amoroso M., Legere J., Smith Ch. *Amer. J. Phys.* **2003**. 71. № 6. 568-573. [РЖ 05.01-18А.141].

Глава 5

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Определение капиллярной постоянной (поверхностного натяжения) жидкостей. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. С. 87-89.

Описаны наиболее простые способы определения капиллярной постоянной жидкостей: 1) способ измерения высоты поднятия жидкости в капиллярных трубках и 2) способ измерения веса капель жидкости. В первом случае пользуются катетометром, а во втором – точными аналитическими весами.

Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкостей по высоте поднятия их в капиллярных трубках и по взвешиванию капель. А.П. Соколов. Физический практикум. 1937, 1938. Работа 22. С. 180.

Определение коэффициента поверхностного натяжения α по высоте h поднятия жидкости плотности δ в капиллярной трубке радиуса r основан на применении уравнения $h=2\alpha\cos\theta/r\delta g$, где θ – краевой угол, g – ускорение свободного падения. Определение α по весу капель, вытекающих из трубки, основано на соотношении $f=\alpha l$, где f – сила сцепления между двумя частями жидкости, поверхность которой мысленно разрезана по линии, длина которой l . Описан также метод, основанный на применении уравнения $\Delta p=2\alpha/R$, где Δp – добавочное давление, вызванное кривизной поверхности пузырька воздуха, образующегося на конце трубки, слегка погруженной в жидкость, когда пузырек прорывается через ее поверхностный слой, R – радиус кривизны поверхности пузырька.

Изучение зависимости коэффициента поверхностного натяжения от концентрации и температуры по методу Кантора–Ребиндера. А.П. Соколов. Физический практикум. 1937, 1938. Работа 23. С. 185.

В используемом приборе есть плотно закрытый сосуд, в который наливается некоторое количество исследуемой жидкости. Через отверстие в пробке в этот сосуд вводится т. н. “кончик”, представляющий собой стеклянную трубку, нижний конец которой оттянут так, что выход канала весьма узок. Этот “кончик” помещается на уровне испытуемой жидкости так, чтобы он соприкасался с ее поверхностью. При вытекании воды из соединенного с этим сосудом другого сосуда в верхней части первого образуется разреженное пространство. При некотором определенном разрежении избыток атмосферного давления проталкивает через “кончик” в сосуд пузырек воздуха. Это происходит тогда, когда разность давления атмосферного воздуха и воздуха в сосуде, измеряемая разностью высот уровней жидкости в коленях манометра, соединенного с этими сосудами, уравновешивает давление, вызываемое поверхностным натяжением испытуемой жидкости, стремящейся сжать образующийся пузырек. Если обозначить эту разность давлений через H , а коэффициент поверхностного натяжения исследуемой жидкости через α , то в момент отрыва пузырька будет существовать соотношение $\alpha=AH$, где A – коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров “кончика”, т. е. величина, постоянная для данного прибора и определяемая при проведении опыта с известной жидкостью.

Определение краевых углов по методу Талмуда и Лубман. А.П. Соколов. Физический практикум. 1937, 1938. Работа 24. С. 187.

Метод измерения краевых углов основан на том, что форма капли жидкости, на которую практически не влияет сила тяжести, зависит только от поверхностного натяжения. Для уменьшения силы тяжести, сплюсывающей каплю, берется возможно меньшая капля испытуемой жидкости и помещается в другую жидкость, мало отличающуюся по плотности от первой. Помещают малую каплю одной жидкости на поверхность твердой пластинки, находящейся в сосуде с другой жидкостью. При этом шарообразная капля, расплываясь более или менее по пластинке (соответственно степени смачивания), всегда будет представлять собой шаровой сегмент. Профиль капли будет иметь вид кругового сегмента. Определив диаметр основания капли и высотокругового сегмента, нетрудно вычислить величину краевого угла θ : $\operatorname{tg}\theta = \sqrt{2hr - h^2} / (r - h)$ – здесь h – высота мениска, r – радиус основания капли.

Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкостей методом взвешивания капель. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 27 а. М.-Л. 1949. С. 62.

Если жидкость медленно вытекает из нижнего конца узкой вертикальной трубки, то образуются капли, которые, достигая предельного веса, отрываются от трубки. В этот момент вес капли определяется силой поверхностного натяжения вдоль периметра шейки капли, что позволяет записать: $p = \alpha \cdot 2\pi r$, где p – вес капли, r – радиус шейки капли в ее наиболее узкой части, где происходит разрыв, и α обозначает коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Из этой формулы имеем: $\alpha = p / 2\pi r$.

Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкостей методом капиллярных трубок. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 27 б. М.-Л. 1949. С. 64.

Смачивающая жидкость внутри капиллярной трубки образует вогнутый мениск, который при простейших расчетах принимают обычно за часть сферической поверхности. Если имеет место полное смачивание, т. е. если краевой угол равен нулю, то поверхность жидкости в капилляре считают полусферой, радиус которой равен радиусу капилляра. Давление поверхностного слоя жидкости внутри капилляра при вогнутом мениске должно быть меньше по сравнению с давлением поверхностного слоя вне капилляра, где поверхность жидкости остается плоской. Разность этих давлений можно определить по формуле Лапласа. В работе применяются три различных капилляра, которые можно устанавливать вертикально в особом штативе и погружать нижними концами в воду или другую жидкость. Обозначая радиусы капилляров через r_1 , r_2 и r_3 , в результате анализа поведения жидкости в капиллярах можно прийти к следующим выражениям для коэффициента исследуемой жидкости α , удельный вес которой γ :

$$\alpha = \frac{r_1 r_2}{2(r_2 - r_1)} (h_1 - h_2) \gamma = \frac{r_1 r_3}{2(r_3 - r_1)} (h_1 - h_3) \gamma,$$

где разности высот жидкости в капиллярах $(h_1 - h_2)$ и $(h_1 - h_3)$ можно измерить с достаточной точностью при помощи горизонтального микроскопа.

Определение температурного коэффициента поверхностного натяжения жидкостей методом воздушных пузырьков. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 27 с. М.-Л. 1949. С. 66.

Коэффициент поверхностного натяжения жидкостей можно определять, измеряя то давление, которое необходимо для образования внутри жидкостей воздушных пузырьков определенного размера. Основным элементом устройства для измерения коэффициента поверхностного натяжения является пробирка, в которую налита исследуемая жидкость. В эту же пробирку сверху опущена стеклянная трубочка, нижний конец которой сильно оттянут, так что ее кончик имеет очень узкое выходное отверстие. Если в трубочку направить очень слабую струю воздуха, то из ее нижнего кончика начинают выходить пузырьки воздуха. Регулируя струю воздуха, можно достичь того, что пузырьки воздуха образуются через каждые 20–25 сек. Наблюдая при этих условиях за показаниями микроманометра, измеряющего давление в струе воздуха, нетрудно убедиться в том, что давление в трубочке изменяется при образовании каждого пузырька; давление непрерывно растет и достигает определенного максимума непосредственно перед моментом отрывания пузырька, а при отрывании пузырька давление быстро падает. Капиллярное давление внутри пузырька достигает наибольшей величины $(\Delta p)_{\text{макс.}}$, когда пузырек имеет форму полусферы, радиус которой равен радиусу выходного отверстия трубочки. При этом, согласно Лапласу, можно записать: $(\Delta p)_{\text{макс.}} = 2\alpha/\rho$, где ρ обозначает радиус выходного отверстия трубочки. Из этой формулы имеем: $\alpha = \rho(\Delta p)_{\text{макс.}}/2$. Вследствие малости выходного отверстия трубочки и его нестрогой формы величину ρ определить трудно. Поэтому последнюю формулу записывают в виде $\alpha = k(\Delta p)_{\text{макс.}}$ и величину k определяют для каждой трубочки в отдельности.

Определение коэффициента поверхностного натяжения по высоте поднятия жидкости в капиллярных трубках. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. 1951. Задача 27. С. 151-160. 1953, 1955. Задача 27. С. 153-162. 1962. Задача 35. С. 176-181. 1967. Задача 50. С.240-244.

Капиллярные трубки предварительно тщательно промывают раствором двухромеокислого калия, в серной кислоте, а затем дистиллированной водой и спиртом. Их внутренний диаметр измеряется с помощью микроскопа в нескольких сечениях. Лишь после этого трубки укрепляют вертикально, частично погрузив их в стакан с дистиллированной водой. Используются три трубки. Высоту столба жидкости в трубках измеряют с помощью катетометра КМ-10. Коэффициент поверхностного натяжения вычисляют по формулам:

$$\alpha = \frac{r_1 r_2}{2(r_2 - r_1)} (h_1 - h_2) \delta g = \frac{r_1 r_3}{2(r_3 - r_1)} (h_1 - h_3) \delta g ,$$

где r_1, r_2, r_3 – радиусы каналов трубок, h_1, h_2, h_3 – высоты жидкости в трубках, δ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения.

Определение коэффициента поверхностного натяжения при помощи горизонтального капилляра. Физический практикум. Молекулярная физика.

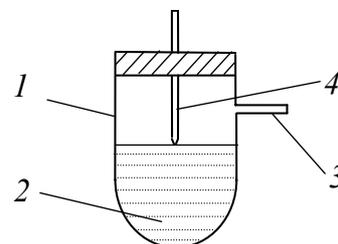
Под ред. проф. В.И. Ивероной. 1951. Задача 28. С. 160-162. 1953, 1955. Задача 28. С. 162-164. 1962. Задача 36. С. 181-183. 1967. Задача 51. С. 245-246.

Если в горизонтально расположенный капилляр ввести каплю исследуемой жидкости, смачивающей стенки капилляра, то на торцах столбика жидкости оба мениска будут вогнутые. Повысив давление с одной стороны, можно подвести столбик к концу капилляра и сделать поверхность одного торца столбика плоской. Разность давлений с двух сторон столбика жидкости при этом может быть измерена с помощью U-образного манометра, разность высот уровней в котором измеряется катетометром или горизонтальным микроскопом. В этом случае для коэффициента поверхностного натяжения α имеем: $\alpha = (r\rho gh)/2$, где r – радиус капилляра, ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, h – разность высот уровней в манометре.

Изучение зависимости коэффициента поверхностного натяжения раствора от его концентрации и температуры по методу максимального давления в пузырьке. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероной. 1951. Задача 29. С. 162-165. 1953, 1955. Задача 29. С. 164-167. 1962. Задача 37. С. 183-186. 1967. Задача 52. С. 246-249.

Основным элементом установки является плотно закрытый сосуд 1 , наполненный водой 2 и через отросток 3 соединенный с манометром. Через отверстие в пробке в этот сосуд вводится т. н. “кончик”, представляющий собой стеклянную трубку, нижний конец которой оттянут так, что выход канала трубки весьма узок. Этот “кончик” помещается на уровне испытуемой жидкости так, чтобы он соприкасался с ее поверхностью.

С помощью дополнительного устройства в верхней части сосуда образуется разреженное пространство. При некотором определенном разрежении избыток атмосферного давления проталкивает через “кончик” в сосуд 2 пузырек воздуха. Это происходит тогда, когда разность давления атмосферного воздуха и воздуха в сосуде 1 уравновешивает давление, вызываемое поверхностным натяжением испытуемой жидкости, стремящейся сжать образующийся пузырек.



В момент отрыва пузырька между этой разностью давлений H и коэффициентом поверхностного натяжения α будет существовать соотношение $\alpha = AH$, где A – коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров “кончика”, т. е. величина, постоянная для данного прибора. Эту постоянную можно определить, произведя описанный опыт с жидкостью, коэффициент поверхностного натяжения которой α_0 известен, например, с водой. Тогда коэффициент поверхностного натяжения α испытуемой жидкости выразится формулой $\alpha = \alpha_0 H/H_0$.

Прибор Клерка Максвелла для определения величины поверхностного натяжения. Хопли. Clerk Maxwell's apparatus for the measurement of surface tension. Hopley I. B. Ann. Sci. and Bull. Brit. Soc. History Sci., 1957. 13.2, № 3.18, Annals, 180-187. [РЖФиз. 1960 № 5. 10227].

Впервые описан оригинальный метод определения поверхностного натяжения, предложенный Максвеллом. Исследуемую жидкость наливают в небольшой сосуд. В крышке сосуда устанавливают 2 трубки. В каждой трубке имеется

диафрагма с отверстием диаметром 4 мм. В одной трубке жидкость, поднимаясь, образует в отверстии диафрагмы вогнутый мениск. В другой трубке в отверстие диафрагмы вставлена короткая вертикальная трубочка. При опускании в жидкость в ней образуется выпуклый мениск. Приведены оптическая схема и описание микроскопа Максвелла для рассмотрения менисков и формулы для расчета радиусов кривизны поверхностей и величины поверхностного натяжения.

Метод пузырей для измерения поверхностного натяжения жидкостей. Мюллер В. Metoda bublin k merenf povrchoveho nareti kapalin. Muller Vaclav. Prirod. Vedy skole, **1957**, 7, № 6, 534-539. [РЖФиз. 1958 № 2 2577].

При выдувании пузыря из капиллярной трубки, погруженной в исследуемую жидкость, необходимое для этого давление определяется величиной гидростатического давления жидкости и капиллярным давлением, величина которого зависит от поверхностного натяжения жидкости и диаметра капилляра. Описывается методика эксперимента, позволяющего измерить величину поверхностного натяжения, приведены расчетные формулы. Указывается, что при исследованиях органических жидкостей метод обеспечивает точность 0,3 %.

Самостоятельные измерения поверхностного натяжения. Кланси. “Do-it-yourself” measurement of surface tension. Clancy Edward P. *Amer. J. Phys.* **1958**, 26, № 5. С. 341-342. [РЖФиз. 1959 № 1 103].

Автор предлагает измерять силу поверхностного натяжения воды весами Жолли, к одному концу коромысла которых подвешен проволочный треугольник (одна сторона его касается поверхности воды), а к другому прикладывается вес грузиков.

Недорогой прибор для определения поверхностного натяжения. Джексон, Грей. Inexpensive surface tension apparatus. Jackson Herbert L., Gray Garnett G. *Amer. J. Phys.*, **1959**, 27, № 3. С. 186-197. [РЖФиз. 1959. № 12. 26445].

Описан простой прибор, состоящий из равносторонней трехгранной пирамидки, подвешенной на пружине. Исследуемую жидкость наливают в чашу с плоским дном, которая плавает в стеклянном цилиндре, наполненном водой. В цилиндре установлено центрирующее устройство для того, чтобы во время работы чаша с жидкостью не касалась стенок. Через отверстие в дне цилиндра осуществляется спуск воды, в результате чего чаша опускается вниз и увлекает за собой пирамидку, вызывая натяжение пружины. Поверхностное натяжение определяется по величине растяжения пружины в момент отрыва.

Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости по способу отрывания кольца. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, **1959**. Работа 23. С. 83-86.

Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрывания капель. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, **1959**. Работа 24. С. 86-89.

Изучение зависимости коэффициента поверхностного натяжения жидкости от концентрации и температуры по методу Кантора–Ребиндера. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, 1959. Работа 25. С. 89-91.

Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости из подъема в капиллярах. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, 1959. Работа 29. С. 98-104.

4. Определение коэффициента поверхностного натяжения волновым методом. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. 1962. Задача 40. С. 193-199. 1967. Задача 53. С.249-255.

Колеблющийся стерженек электромеханического вибратора касается поверхности воды или другой жидкости в кювете и возбуждает на ней круговые поверхностные волны. Измерение длины волны λ производится с помощью штангенциркуля. Для этого подносят штангенциркуль к поверхности жидкости и устанавливают его так, чтобы на дне ванночки между внутренними границами теней от ложек штангенциркуля располагалось целое число волн. Коэффициент поверхностного натяжения испытываемой жидкости α вычисляется по формуле

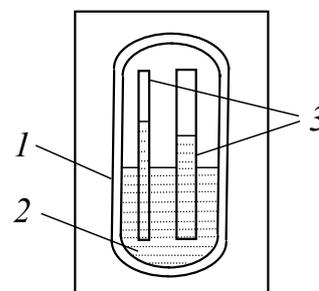
$$\alpha = \rho \frac{\lambda^3 v^2}{2\pi} - \rho \frac{\lambda^2 g}{4\pi^2},$$

где ρ – плотность жидкости, v – частота колебаний вибратора, g – ускорение свободного падения.

Определение коэффициента поверхностного натяжения в большом интервале температур. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Сост.: А.Г. Белянкиным, Г.П. Мотулевич, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. М. 1962. Задача 42. С. 202-208.

Определяется коэффициент поверхностного натяжения этилового эфира при изменении его температуры от комнатной до критической путем измерения высоты поднятия жидкости в капилляре и измерения кривизны мениска.

В стеклянном запаянном сосуде цилиндрической формы 1 содержится жидкость 2. Внутри сосуда укреплены две капиллярные трубки 3 с различными радиусами r_1 и r_2 их внутренних сечений. Капиллярные трубки параллельны между собой и со стенками сосуда. Самый сосуд с капиллярными трубками помещен внутри нагревателя. Температура жидкости измеряется с помощью термодпары. В стенках нагревателя имеется два окна, через которые производится наблюдение менисков в капиллярных трубках с помощью зрительной трубы. Давление в стеклянном сосуде при нагревании растет и доходит (в критическом состоянии) до 35 атм. Коэффициент поверхностного натяжения вычисляется по формуле



$$\alpha = \frac{(h_1 - h_2)(\rho_{жс} - \rho_n)g}{4} \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2} \frac{r_3^2 + \delta_3^2}{r_3 \delta_3},$$

где h_1 и h_2 – высоты отдельных столбиков жидкости в капиллярах, $\rho_{жс}$ и ρ_n – плотность жидкого этилового эфира и его паров соответственно (берутся из приданной таблицы для температур от 20°C до критической, равной $194,5^0 \text{C}$), g – ускорение свободного падения, r_1 и r_2 – радиусы кривизны капилляров, r_3 – радиус кривизны вспомогательной трубки, с помощью которой определяется глубина мениска.

Изучение зависимости коэффициента поверхностного натяжения жидкости от температуры и от концентрации раствора. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть II. МИФИ. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. 1962. Работа 15. С. 81.

Определение коэффициента поверхностного натяжения мыльного раствора измерением давления внутри цилиндра из мыльной пленки. Grull Rurt. Bestimmung der Jberflachenspannung einer Seifenlosung durch Messung des Uberdruckes in Seifenhautzykindern. "Prax. Naturwiss.", 1963, A12, № 3, Physik, 58-59, [РЖФиз. 1963 10A98].

Отмечается, что если между двумя параллельными пластинами образуется мыльный пузырь, то он принимает форму кругового цилиндра, основания которого совпадают с поверхностью пластин. Избыточное давление P внутри такого цилиндра из мыльной пленки зависит от диаметра цилиндра d и от поверхностного натяжения σ и не зависит от его высоты. Зависимость между P , d и σ может быть использована для определения σ . Опыт проводится при помощи специального устройства из оргстекла, позволяющего получить цилиндрический мыльный пузырь. Внутреннее пространство пузыря соединяется с резиновой грушей и с одним коленом манометрической трубки, наполненной бензином и наклоненной под углом 30^0 к горизонту. При помощи двух проекторов круговое сечение цилиндра из мыльной пленки и положение уровней жидкости в манометре рассматриваются в вертикальной проекции. Измерив диаметр цилиндра и разность уровней, можно рассчитать коэффициент поверхностного натяжения по формуле $\sigma = Pd/4$.

Изучение зависимости коэффициента поверхностного натяжения жидкости от температуры с помощью прибора Ребиндера. Под ред. Л.Л. Гольдина. 1964. Работа 27. С. 158-162. 1973. Работа 30. С. 196-201. 1983. Работа 3.9. С. 215-222.

Исследуется коэффициент поверхностного натяжения воды в функции температуры и коэффициент поверхностного натяжения раствора спирта в функции концентрации раствора.

Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца; измерение диаметра капиллярной трубки. Под ред. Л.Л. Гольдина. М., 1964. Работа 28. С. 162-168.

Экспериментальная установка представляет собой весы Жоли. После определения коэффициента поверхностного натяжения α дистиллированной воды

исследуется влияние примесей на величину α . Радиус капилляра находится по формуле

$$R = \frac{2\alpha}{\rho g h_0} \left[1 - \frac{1}{3h_0} \frac{2\alpha}{\rho g h_0} \right],$$

где ρ плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, h_0 – высота поднятия жидкости в капилляре.

Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости в большом интервале температур и определение ее критической температуры. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В.И. Ивероной. 1967. Задача 54. С.255-261.

Коэффициент поверхностного натяжения этилового эфира определяется при изменении его температуры от комнатной до критической путем измерения высоты поднятия жидкости в капилляре и измерения кривизны мениска.

Тензиметр. Taulor Julius H. Tensiometer. "Phys. Teacher", 1972, 10, № 8. 478. [РЖ 1973 3А105].

Описывается лабораторный тензиметр для измерения коэффициента поверхностного натяжения воды. Тензиметр состоит из пенополистиролового груза конической формы и противовеса, подвешенных к тройным рычажным весам. Под грузом устанавливается на подставке с регулируемой высотой кювета с исследуемой жидкостью, например, водой. Конический груз соприкасается своим дном с поверхностью воды. Для того, чтобы прервать контакт между водной поверхностью и грузом, необходимо приложить силу, величина которой определяется на рычажных весах. Дальнейший расчет ведется по формуле $\gamma = fF/4\pi R$, где f – максимальная сила, регулируемая на весах, F – поправочный коэффициент, R – радиус пенополистиролового грузика. Тензиметр предназначен для лабораторных работ в средних школах и колледжах.

Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Изд. 2-е. "Наука". 1973. Работа 31. С. 201-209.

В лабораторной работе измеряется коэффициент поверхностного натяжения воды и мыльного раствора методом отрыва кольца с использованием весов Жоли, а также определяется диаметр капиллярной трубки.

Измерение коэффициента поверхностного натяжения методом капиллярных волн. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Изд. 2-е. "Наука". 1973. Работа 32. С. 209-213.

Теория капиллярно-гравитационных волн приводит к следующей формуле для их скорости:

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\alpha}{\rho\lambda}},$$

где v – фазовая скорость распространения волны, g – ускорение свободного падения, λ – длина поверхностной волны, α – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, ρ – плотность жидкости. Возбуждая в жидкости волны с достаточно малой λ , можно сколь угодно уменьшить вклад гравитационных сил в выражение для скорости распространения волн. При этом приведенная формула упрощается, и из нее следует выражение для α :

$$\alpha = \frac{\rho \lambda}{2\pi} v^2.$$

Эксперимент по определению поверхностного натяжения и давления мяча. Hoyt G.D. Experiment on surface tension and pressure of a ballon. “*Phys. Teacher*”, 1975, 13, № 6, 355. [РЖ 1976 2A124].

Описан эксперимент, который является моделью кинетических исследований глазного яблока и предназначен для студентов биологических отделений высших учебных заведений. Эксперимент выполняется с обычным резиновым мячом диаметром 15 см. Студенты измеряют давление в мяче двумя разными способами и затем, используя аналитическое выражение, связывающее поверхностное натяжение и внутреннее давление, вычисляют величину поверхностного натяжения мяча. Описанная методика пригодна для определения внутреннего давления жидкости в глазном яблоке человека или животного при известном поверхностном натяжении.

Изучение зависимости коэффициента поверхностного натяжения раствора от его концентрации и температуры методом максимального давления в пузырьке. Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. (Учебное пособие). Одесса. 1977. Задача 16. С. 68-70.

Поверхностное натяжение. Surface tension. Gaglardi K. “*Phys. Educ.*” 1980. 15, № 3. 154. [РЖ 1981 1A93].

Предложен метод измерения коэффициента поверхностного натяжения жидкости, являющийся модификацией известного метода отрыва кольца или рамки от поверхности жидкости. Характерной особенностью предложенного подхода является то, что вместо опускания сосуда с жидкостью или поднятия проволоочной петли, уровень жидкости в сосуде регулируется удалением воды через отводную трубку; это позволяет исключить механические вибрации, являющиеся основным источником ошибок эксперимента. Основная часть оборудования представляет собой мерный сосуд емкостью 1500 мл с отводной трубкой у дна, установленный на деревянном основании. Второй конец отводной трубки опущен в сосуд такой же емкости. Решетка, используемая в опыте, подвешивается с помощью очень мягкой пружины (постоянная пружины около 1,2 Н/м). Уровень жидкости в сосуде в момент отрыва решетки может быть измерен с точностью порядка 1%. Точность определения коэффициентов натяжения – порядка 5%. Следует обратить внимание на обеспечение одновременного отрыва всей решетки от поверхности жидкости. Отмечается, что предложенный метод в силу своей наглядности может быть с успехом применен в лабораторном практикуме.

Устройство для измерения коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом капиллярных волн Релея. Гозман Е.Б. [СКБ М-ва высш. и средн. спец. образования СССР. Авт. св. СССР, кл. G09 В 23/12, № 849286, заявл. 16.07.80, № 2798982, опубл. **28.07.81**. [РЖ 1982 7А74П].

Патентуется учебный прибор для измерения поверхностного натяжения жидкости методом капиллярных волн. Прибор содержит корпус с отверстием, закрытым шторкой, установленную в нем кювету с жидкостью и возбудитель колебаний, состоящий из элементарного вибратора и связанного с ним кронштейна со штырем, размещенного над емкостью, а также стробоскопический осветитель и измеритель. С целью повышения точности измерений и удобства кронштейн снабжен регулировочным винтом и состоит из двух частей дугообразной формы, один конец каждой установлен с возможностью поворота на оси, а другой связан с регулировочным винтом. Штырь контейнера укреплен в точке перекрещивания упругих элементов и размещен в отверстии крышки.

Установка для определения величины краевого угла смачивания поверхности твердого тела жидкостью. Никогосян С.С., Овсепян А.А., Зозуля В.Ю., Малинский Ю.М. “Завод. лаб.” **1988**. 54, № 6, 61-62. [РЖ 1988 11А112]

Предлагаемая установка использует распространенный метод “лежащей” капли. При этом капля помещается в специальную термостатированную ячейку, обеспечивающую нужный температурный режим (время установления режима – 15–20 мин). Измерение угла смачивания, а также высоты и диаметра капли производятся при помощи базового микроскопа БМИ-1 с угломерным устройством. Наличие набора сменных стаканов с различными подложками для капли позволяет производить ряд измерений без нарушения режима в зоне термостатированной ячейки, что значительно экономит время при проведении цикла измерений. Результаты контрольных измерений совпадают с известными литературными данными.

Измерение коэффициента поверхностного натяжения. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. **1988, 1999**. Лаб. работа 4.3. С. 100–103.

Экспериментально определяется коэффициент поверхностного натяжения воды методом поднятия жидкости в клине. Клинообразован двумя стеклянными полированными пластинками, опущенными вертикально в исследуемую жидкость. Пластинки образуют между собой малый угол.

Улучшенный и полуавтоматический вариант капельной методики для измерения коэффициента поверхностного натяжения. An improved and semi automated version of the drop volume technique for interfacial tension measurement. Doyle P.J., Carroll B.J. *J.Phys. E.* -**1989**. -22, №7. -С. 431-433. [РЖ 1990 2А97]

Предложен способ усовершенствования капельной методики для измерения поверхностного натяжения. Метод состоит в точном измерении объема капли, только что отделившейся от цилиндра известного радиуса, с последующим расчетом натяжения по эмпирической формуле, включающей плотность вещества. Предлагается использовать новую пипетку с микрометрической головкой для подачи капель, позволяющую значительно расширить диапазон измеряемых поверхностных натяжений. Измерительная установка автоматизирована на базе

микроамперметра. Составлена программа для расчета поверхностного натяжения и оценки погрешности измерений. Методика использовалась для исследования систем силиконовое масло–вода. Обсуждаются возможности дальнейшего совершенствования системы.

Экспериментальные методы измерения граничного поверхностного натяжения. Demeter V. Janos. A felületi feszultseg moresenek gyakorlati modszeri. *Magy. kem. lap.* -1991.-46, № 6. С. 248-252, 289.

Сделан обзор существующих методов измерения коэффициента поверхностного натяжения от простейших, на основе капиллярности и веса капли, до сложных, использующих электронные приборы. Приведены ошибки измерений, которые колеблются в пределах 0,02-0,5 мН/м. Проанализированы области применения, недостатки и преимущества каждого метода и приведены формулы расчетов, а также времена отклика устройств и степени автоматизации.

Катастрофические изменения в мыльных пузырях, подверженных деформации. Catastrophic changes in soap bubbles subjected to deformation. Ramme Goran. *Phys.Educ.* – 1991. – 26, № 2. – С. 104-109. [РЖ 1991 11А98]

Описан ряд изящных экспериментов по исследованию сил поверхностного натяжения. В качестве объекта исследования берется мыльный пузырь на каркасе из двух одинаковых стальных проволочных колец, закрепленных в параллельных плоскостях при помощи штативов. Пузырь может подвергаться деформации благодаря изменению давления воздуха внутри него либо благодаря изменению взаимной ориентации колец. Измерение силы производится при помощи прецизионных электронных весов. Анализируется влияние концентрации и состава раствора на силы поверхностного натяжения. Приводится схема экспериментальной установки. Анализ полученных результатов носит в основном качественный характер.

Капиллярный радиус и поверхностное натяжение. Вычисления на основе закона Тэйта. Capillary radius and surface tensions: Using calculations based on Tat's law. Worley John D J. *Chem. Educ.* 1992. 69, № 8. С. 678-680. [РЖФиз. 1993-5А104].

Предлагается лабораторный эксперимент по определению радиуса неизвестного капилляра при помощи простого и недорогого химического оборудования (капилляры, пипетка и т. п.) и электронных весов, позволяющих определять массу с точностью не менее 0,1 мг. Измерение основано на законе Тэйта (масса капли, отрывающейся от капиллярной трубки, пропорциональна радиусу капилляра). В эксперименте непосредственно при помощи весов определяется масса капли и затем вычисляется радиус капилляра. При этом коэффициент поверхностного натяжения жидкости, входящий в коэффициент пропорциональности закона Тэйта, считается известным. Описывается методика проведения эксперимента. Приводятся характерные результаты.

Сопrotивляющиеся баллоны. The baffling balloons! Fox John N. *Phys. Educ.* 1993. 28, № 5. С. 325-326. [РЖФиз. 1994-2А77].

Портативный прибор для определения поверхностного натяжения жидкостей. Бердышев А.И., Перцевский А.Л. Завод. Лаб. **1993.** 59, № 8. С. 41-42. [РЖФиз. 1994-5A65].

Для определения поверхностного натяжения жидкостей используется метод наибольшего давления пузырька. Описан простой портативный прибор, в котором равномерное давление воздуха создается за счет перетекания воды из одного сосуда в другой.

Закон Жюрена. Loi de Jurin. Tournier R. Bull. Union Phys. **1994.** 88, № 765. С. 1053-1058. [РЖФиз. 1994 12A88].

Предложена оригинальная методика изложения закона Жюрена (высота жидкости в капилляре обратно пропорциональна радиусу капилляра). Ученикам предложено опытным путем определить высоту мениска над уровнем жидкости. В качестве капилляра используются две стеклянные пластинки, образующие двугранный угол.

Изучение механизма образования и отрыва капель от капилляра. Майер В.В., Мамаев Е.С., Иванов Ю.В. Пробл. учеб. физ. эксперим. **1997.** № 3. 46-48 [РЖ 1997. 12A172].

Задачей проведенного исследования явилось выяснение условий, в которых остается корректной простейшая модель явления отрыва капель от капилляра, наиболее приемлемая в учебном эксперименте.

Подпрыгивающая капля. Жук Л.А., Иванов Ю.В. Учеб. физ. **1997.** № 1 37-39. [РЖ 1998. 12A108].

Привычно думать, что если капля вытекает из какой-нибудь трубки, то она обязательно стекает вниз. Однако не всегда это происходит так. В некоторых случаях капля не опускается вниз по трубке, а поднимается на нее. Порой возникает впечатление, что она вначале запрыгивает на трубку, а затем сползает вниз и отрывается. Это явление нетрудно пронаблюдать даже у себя дома.

Измерение поверхностного натяжения. Падерина Е.В. Пробл. учеб. физ. эксперим. **1998.** № 4 53-55. [РЖ 1999 1A110].

Рассмотрены результаты измерения коэффициентов поверхностного натяжения воды методом отрыва капель, по высоте подъема воды в капилляре, по разности высот в сообщающихся сосудах, по массе иглы, удерживающейся на поверхности воды.

Определение коэффициента поверхностного натяжения фазометрическим методом. П.С. Булкин, И.И. Попова. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Изд. моск. ун-та. **1999.** Лаб. работа 4.4.С. 104-108.

Коэффициент поверхностного натяжения воды определяется путем измерения скорости распространения плоской капиллярной волны по поверхности жидкости. Капиллярные волны возбуждаются вибратором, на конце которого укреплен длинная вертикальная пластинка, касающаяся поверхности воды.

Недорогой и точный тензиометр, использующий электронные весы. An inexpensive and accurate transiometer using an electronic balance. Dolz M.,

Delegido J., Hernandez M. J., Pellier J. *J. Chem. Educ.* **2001**. 78, № 9. 1257-1259. [РЖ 02.10-18А.137].

Предложена модификация тензиометра Леконта дю Нуй, которая, обеспечивая отличные результаты при измерении поверхностного натяжения, обеспечивает и возможность выполнения студентами младших курсов интересного, простого и недорогого эксперимента.

Классический метод определения коэффициента поверхностного натяжения воды. Кондрашов Б.Н. *Вопр. прикл. физ.* **2001**. № 7, 15-16. [РЖ 03.01-18А.162].

Классический опыт, демонстрирующий поверхностное натяжение жидкости, реализуется с помощью П-образной проволочной скобы с подвижной перекладиной-бегунком, который движется по скобе под действием сил поверхностного натяжения. Этот многократно описанный в учебной литературе опыт, несмотря на свою наглядность, имеет и недостатки: во-первых, он производится не на чистой жидкости, а на растворе мыла, а во-вторых, реализовать на практике параллельное перемещение бегунка по скобе достаточно затруднительно. Автору удалось обойти эти трудности, используя в качестве жидкой пленки воду, а изменив форму бегунка, удалось решить проблему параллельного его движения вдоль скобы.

Об экспериментальной оценке поверхностного натяжения воды, используемой в некоторых учебниках. On the experimental values of the water surface tension used in some textbooks. Pellicer J., Garcia-Morales V., Guanter L., Hernandez M.J., Dolz M. *Amer. J. Phys.* **2002**. 70, № 7. 705-709. [РЖ 03.05-18А.146].

Количественное измерение менисковых сил с помощью электронных весов: прямые измерения поверхностного натяжения жидкости. Физико-химический эксперимент. Quantifying meniscus forces with an electronic balance: direct measurement of liquid surface tension: A physical chemistry experiment. Digilov R.M. *J. Chem. Educ.* **2002**. 79, №3. 353-355. [РЖ 03.04-18А.148].

Определены условия, при которых сила поверхностного натяжения Вильгельми значительно слабее, чем капиллярная сила Лапласа, и не зависит от геометрии контакта с твердым веществом и ею можно пренебречь. Описана простая установка с электронными весами для прямого определения поверхностного натяжения через измерения капиллярной силы между сферой и пластиной с мостиковой капелькой. Метод достаточно прост и имеет преимущество над большинством традиционных методик (тензиометр Леконзи дю Нуй, пластина Вильгельми, капиллярный подъём, максимальное давление проскакивания пузырька), заключающееся в том, что требуется только небольшое количество жидкости, чтобы измерить поверхностное натяжение и никаких корректирующих факторов не требуется.

Исследование поверхностного натяжения жидкости. Баженов И.И., Блейхер А. М. *Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения. Седьмая Всеросс. конф.* Глазов. **2002**. С. 17.

Приведены результаты учебного исследования зависимости коэффициента поверхностного натяжения от плотности жидкости и времени воздействия на жидкость электрического и магнитного полей.

Определение поверхностного натяжения и соответствующих термодинамических параметров спирта с помощью сталагмометра Traube. Surface tension and related thermodynamic parameters of alcohols using the Traube stalagmometer. Dilmohamund B.A., Sceneevassen J., Rughaopulh S.D.D. V., Ramasimi P. *Eur. J. Phys.* **2005.** 26, № 6. 1079-1084. [РЖ 07.05-18А.137].

Измерение температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом давления в пузырьке. Смирнова Т.П., Евдокимова Л.А. *Физика в системе современного образования: ФССО-05: Труды 8 Международной конференции*, С.-Петербург 29 мая-3 июня **2005.** СПб.2005. 107-109. [РЖ 07.01-18А.136].

Описана экспериментальная установка, методика проведения исследований, представлены результаты измерений. За основу прибора взята конструкция, разработанная П.А. Ребиндером, в которой изогнутая трубка с капиллярным наконечником погружается в сосуд с исследуемой жидкостью.

Капилляр и его экспериментальное измерение. Червова А.А., Гримыко В. В. *Физика в системе современного образования: ФССО-05: Труды 8 Международной конференции*. С.-Петербург, 29 мая – 3 июня **2005.** СПб. 2005. 369-369б. [РЖ 07.03-18А.135].

Предложено в основу определения капилляра положить обязательное существование добавочного давления Лапласа в трубке-капилляре. Капилляр – это трубка, в которой есть искривлённая поверхность, и нет плоского участка поверхности жидкости. Это определение капилляра предполагает подъем или опускание уровня жидкости в трубке, опущенной в широкий сосуд с жидкостью. Приведено экспериментальное определение максимального диаметра трубки, начиная с которого она становится капилляром для воды. Измерения показали, что при диаметре порядка 4 см в трубке возникает добавочное давление Лапласа.

Определение свободной, связанной и полной энергии единицы поверхностного слоя чистой жидкости на основе измерений коэффициента поверхностного натяжения и его зависимости от температуры. Евдокимова Л.А., Смирнова Т.П. *ФССО-05. Материалы восьмой Международной конференции*. С. Петербург. **2005.** С. 55-58.

Замечательные свойства мыльной пленки. Иванов Ю.В., Сарамин В.А. Проблемы учебного физического эксперимента: Материалы 11 Всероссийской научно-практической конференции. «Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения», Москва, **2006:** Сборник научных трудов. Вып. 23, М., 2006. 53-58. [РЖ 08.12-18А.116].

Проверено теоретическое и экспериментальное исследование устойчивости и равновесия мыльной пленки, опирающейся на два кольца и кольца различных радиусов.

Измерение поверхностного натяжения с помощью капания жидкости с иглы. Measurement of surface tension by the dripping from a needle. Gianino C. *Phys. Educ.* **2006.** 41, № 5. 440-444. [РЖ 08.08-18А.130].

Принцип работы измерительной ячейки прибора для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом максимального давления Лапласа в пузырьках. Смирнова Т.П. Физика в системе современного образования (ФССО-07): Материалы 9 Международной конференции. Санкт-Петербург, 4–8 июня, **2007**, Т.1 Спб., 2007. 132-135. [РЖ 08.07-18А.129].

Измерительная ячейка состоит из сосуда с боковым отростком. Исследуемую жидкость наливают в сосуд так, чтобы поверхность жидкости находилась ниже уровня бокового отростка. Сосуд закрывают пробкой, через которую проходит стеклянная трубка. Верхний широкий конец трубки соединен с атмосферой, а нижний капиллярный кончик погружен в исследуемую жидкость. При понижении давления над плоской поверхностью жидкости в сосуде происходит понижение мениска в капилляре. Возникает воздушный пузырек. Измеряя манометрически максимальную разность давлений вне и внутри прибора, при которой пузырьки еще не могут отрываться, можно определить коэффициент поверхностного натяжения исследуемой жидкости. Метод является квазистатическим и характеризует свойства обновляемых в процессе измерения поверхностей раздела жидкость – воздух.

Измерение поверхностного натяжения с помощью одноканального дозатора. Measuring surface tension with single-drop dispenser equipment. Thompson F. *Phys. Educ.* **2007.** 42, № 1. 22-23. [РЖ 09.08-18А.116].

К вопросу об эволюции осесимметричных возмущений на куполе всплывающего воздушного пузыря. Ч. 1. Седов С. Ю. Вестник Саровского Физтеха. **2008.** №15. 150-155. [РЖ 09.11-18А.97].

Ранее была разработана методика изучения крупных приближенно сферических пузырей, всплывающих в воде из состояния покоя. Разработана методика создания двухмерного возмущения с осевой симметрией на куполе всплывающего воздушного пузыря в жидкости при помощи кольца из проволоки, положенного на поверхность пузыря из тонкой резины. Показаны некоторые эксперименты по инициированию осесимметричных возмущений на поверхности воздушного пузыря в воде. Представленные кадры показывают последовательное развитие возмущений во времени. Часть экспериментов проводилась с обычной водой, а другая часть с полупроцентным мыльным раствором с пониженным приблизительно в 2.5 раза коэффициентом поверхностного натяжения. Приведены возможные интерпретации наблюдаемой эволюции осесимметричных возмущений на поверхности крупного всплывающего воздушного пузыря.

Глава 6

ВЛАЖНОСТЬ

Определение влажности воздуха и постоянной психрометра Августа. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Работа 11. С. 84. 1937, 1938. Работа 18. С. 160.

В работе используется гигрометр Аллюара, состоящий из латунного призматического резервуара, наполняемого эфиром, и психрометр Августа. Последний состоит из двух термометров, сухого и влажного. Эти термометры укреплены на одном штативе, в нижней части которого помещается вентилятор, приводимый во вращение часовым механизмом. Шарик влажного термометра обмотан тканью, которая смачивается водой.

Определение абсолютной и относительной влажности воздуха. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 32 d. М.-Л. 1949. С. 95.

Метод точки росы. Используемый при этом прибор, называемый гигрометром, состоит из латунного четырехгранного сосуда, передняя сторона которого, очень хорошо отполированная и покрытая позолотой, окружена латунной пластинкой, также отполированной и позолоченной, но отделенной от сосуда узким зазором. Внутри сосуда наливается серный эфир, через который при наблюдениях непрерывно пропускают струю воздуха. Вследствие быстрого испарения эфира сосуд сильно охлаждается, охлаждаются и прилегающие к его стенкам слои воздуха, температура которых через небольшой промежуток времени падает до точки росы. Мельчайшие капельки росы начинают выделяться на стенках сосуда прежде всего на его передней стенке, блестящая поверхность которой при этом становится матовой, тускнеет. Температура эфира при этом и является точкой росы. Далее по таблице плотностей насыщенного водяного пара при различных температурах определяется то количество водяных паров F , которое содержится при насыщении в 1 м^3 воздуха при начальной температуре $t_0^\circ \text{C}$ и f – при точке росы $t^\circ \text{C}$. Величина f дает значение абсолютной влажности воздуха. Относительная влажность воздуха φ находится по формуле: $\varphi = 100 \cdot (f/F)$.

Метод психрометра. Психрометрический метод определения влажности основан на зависимости между скоростью испарения воды и влажностью окружающего воздуха. Воду заставляют испаряться на поверхности резервуара термометра. Для этого его обертывают кусочком батиста или кисеи, которая непрерывно смачивается водой. Испарение воды вызывает охлаждение термометра, и его температура постепенно понижается, пока не наступит тепловое равновесие, при котором дальнейшее охлаждение термометра прекращается и его температура остается постоянной, несмотря на продолжающееся испарение воды. Абсолютная влажность воздуха p находится по формуле

$$p = P - A \cdot H(t_0 - t_1),$$

где P – предельное давление водяных паров, т. е. их давление в состоянии насыщения при температуре испаряющейся воды, H – атмосферное давление, при ко-

тором происходит испарение, t_0 – температура окружающего пространства, t_1 – температура термометра, A – постоянная психрометра, определяемая отдельно.

Определение абсолютной и относительной влажности воздуха и постоянной психрометра. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. 1951. Задача 24. С. 135-139. 1953, 1955. Задача 24. С. 137-141.

Влажность воздуха определяется двумя методами: путем фиксации точки росы и при помощи психрометра. В первом случае использовался гигрометр – прибор, в котором охлаждают металлическую стенку до тех пор, пока на ней не появится роса – измерение температуры ее появления позволяет, пользуясь табличными данными, определить значение относительной влажности. Работа с психрометром состоит в определении разности показаний сухого и мокрого термометров, что позволяет, также с привлечением табличных данных, определить влажность воздуха.

Объемный метод определения влажности воздуха. Малевский. Volumetrische Bestimmung der Gasfeuchtigkeit. Malewski Bernhard. Prax. Naturwiss. 1958. A7, № 7. С. 183-185. [РЖФиз. 1959, № 5, 9731].

Предлагается наглядный метод определения влажности воздуха. К сосуду объемом 2–3 л присоединяют манометр и комбинированный насос (медицинский шприц). Сосуд заполняют влажным воздухом и после охлаждения до комнатной температуры и измерения давления вводят по каплям 25 см³ серной кислоты. Вследствие поглощения паров серной кислотой давление уменьшается. При помощи калиброванного насоса нагнетают воздух в сосуд до тех пор, пока манометр покажет прежнее значение давления. Зная объем сосуда, объем серной кислоты и объем воздуха, введенного в сосуд, рассчитывают влажность воздуха в процентах.

Определение абсолютной и относительной влажности воздуха при помощи гигрометра. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, 1959. Работа 31. С. 104-106.

Психрометр Августа. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, 1959. Работа 32. С. 106–110.

Определение влажности воздуха. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред проф. В.И. Ивероновой. 1962. Задача 43. С. 208-214. 1967. Задача 59. С.277-284.

Влажность воздуха определяется по точке росы, методом психрометра, а также абсолютным весовым методом. Этот метод дает наиболее точные результаты. Он состоит в том, что воздух пропускают через ампулы, содержащие вещества, хорошо поглощающие влагу. Зная увеличение массы ампул и объем пропущенного воздуха, можно определить абсолютную влажность.

Определение влажности воздуха. С.С. Прилежаев. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Методич. пособие для студентов сан. ф-та мед. ин-та. Ленинград. 1962. С. 84–106.

Определение относительной влажности воздуха психрометром. Д.А. Зимин. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Ивановский текст. ин-т. Иваново. **1963**. Работа 10. С. 48-50.

Определение влажности воздуха. Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Под ред. А.П. Максименко. Днепропетровский. гос. ун-т. **1973**. Работа № 1-12. С. 82-87.

Измерения влажности: психрометр, удобный для линии сбора данных. Humadity measurements: a psychrometer suitable for on-line data acquisition. Caporloni Marina, Ambrosini Roberto. *Phys. Educ.* **1992**. 27, № 3. С. 164-166. [РЖФиз. 1993-3А114].

Среди различных метеорологических параметров влажность чаще всего измеряется с низкой надежностью и малой точностью. В частности, большинство современных датчиков, используемых в линиях сбора данных, нуждаются в частой замене или переградуировке из-за загрязнения и старения их активных элементов. Описан ряд усовершенствований на метеостанции физического факультета, весьма поучительных для студентов первого уровня при изучении экспериментальной физики.

Определение влажности воздуха. Зборовский А.В. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. А.А. Игнатьева. Изд. Саратовского ун-та. **1993**. Лаб. работа 9. С. 73-81.

Термоэлектронный датчик влажности воздуха. Цветков Ю.Н., Гусейнов А.Б. Изв. вузов. *Приборостр.* **2000**. 43, № 5. 39-40. [РЖ 01.02-18А128].

Рассматривается способ определения влажности воздуха с использованием датчиков, принцип работы которых основан на явлениях Пельтье и Зеебека. Показана перспективность развития термоэлектронного способа измерения влажности. Приведены некоторые экспериментальные зависимости термо-ЭДС от влажности, а также вольт-амперных характеристик датчиков.

Глава 7

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Определение плотности пара методом Мейера и методом Дюма. К.П. Яковлев. Физический практикум. 1926. С. 79.

Прибор Мейера состоит из стеклянного сосуда с длинной шейкой и отводной трубкой. Его верхнее отверстие закрывается пробкой с щипцами для бросания запаянных баллончиков в расширенную нижнюю часть сосуда. Отводная трубка служит для выхода воздуха, вытесненного парами исследуемой жидкости, заключающейся в баллончике. В определенный момент баллончик бросают в сосуд, где он вследствие расширения жидкости лопаются, и жидкость испаряется, вытесняя некоторый объем воздуха. Плотность d пара жидкости находится по формуле

$$d = \frac{g}{v} \frac{P}{H - \frac{h}{\rho}} \frac{1 + \alpha t}{p},$$

где g – ускорение свободного падения, v – объем воздуха в градуированной трубке, $P = 760$ мм рт. ст., H – показание высоты барометра в мм рт. ст., h – высота столба оставшейся воды в трубке, ρ – плотность ртути, α – коэффициент расширения воздуха, t – температура, p – удельный вес воздуха.

Метод Дюма основан на измерении веса определенного объема пара. Стеклянный шар с оттянутой трубкой имеет вполне определенный вес и объем; в него вводят некоторое количество исследуемой жидкости и помещают его в водяную или масляную баню, которую нагревают на газовой горелке до кипения налитой в бане жидкости; последняя выбирается так, чтобы ее точка кипения лежала на несколько градусов выше точки кипения исследуемой жидкости. Для введения в шар исследуемой жидкости в количестве нескольких кубических сантиметров шар немного нагревают и затем опускают оттянутый кончик его в жидкость, которая при охлаждении шара и вгоняется в него избытком внешнего давления. Затем шар помещают внутри бани. По результатам измерений вычисляют плотность пара.

Определение основных точек термометра и температуры кипения жидкостей. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Задача 16. С. 109. 1937, 1938. Задача 12. С. 137.

Ртутный термометр по своему небольшому объему, по возможности отсчитывать на нем непосредственные температурные показания есть наиболее употребительный лабораторный инструмент для измерения температуры. Однако, чтобы получить с ним точные определения, необходимо знать источники возможных ошибок, происходящих от следующих причин: 1) упругого последствия стекла, 2) выдающегося столбика ртути и 3) мертвого хода термометра. Для определения температуры кипения жидкостей используется прибор Бекмана.

Определение скрытой теплоты парообразования. А.П. Соколов. Физический практикум. М.-Л. 1926. Задача 21. С. 133. 1937, 1938. Задача 16. С. 154.

Основным элементом прибора является кипятыльник, в который наливается исследуемая жидкость. Кипятыльник соединен с рядом других элементов прибора, в частности, с латунным змеевиком, погруженным в калоиметр с водой. Температура калоиметра измеряется термлометром. После выполнения необходимых измерений скрытая теплота парообразования δ вычисляется по формуле:

$$\delta = \frac{(Q + w)\Delta t}{p_1 - p_0} - (T - t_1)c,$$

где Q – вес воды в калоиметре. Δt равно $(t_1 - t_0)$ и выражает повышение температуры в калоиметре, c – удельная теплоемкость исследуемой жидкости, T – температура кипения жидкости и w – водяной эквивалент калоиметра; последнюю величину находят, умножая вес калоиметра на удельную теплоемкость латуни.

Определение точки кипения жидкостей при помощи точного ртутного термометра. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 26 а. М.-Л. 1949. С. 53.

Измерение температуры твердой углекислоты и жидкого азота при помощи термоэлемента. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 26 б. М.-Л. 1949. С. 54.

В данной работе для измерения низких температур применяется термопара железо-константан.

Определение точки плавления двухромокислого калия при помощи электротермометра сопротивления. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 26 с. М.-Л. 1949. С. 56.

Измерение температуры при помощи электротермометра сопротивления основано на зависимости электрического сопротивления металлов от температуры. Температурный коэффициент сопротивления чистых металлов имеет очень большую величину и оказывается вполне постоянным, в особенности для металлов, химически устойчивых при высоких температурах, например таких, как платина, которая обычно и применяется как материал для изготовления электротермометров. Такие электротермометры можно применять для точного измерения температур приблизительно до 1000°C . Электротермометр сопротивления обычно состоит из очень тонкой платиновой проволочки или ленты, которые наматываются в виде спирали на кварцевую трубочку, заключенную внутри защитного серебряного цилиндра. Концы платиновой проволочки соединены с хорошо изолированными проводами, посредством которых электротермометр включается как одно из сопротивлений в схему моста постоянного тока. Для определения точки плавления двухромокислого калия в электрическую печь вставляют высокий фарфоровый тигель, в который насыпают небольшое количество двухромокислого калия в порошке. Затем укрепляют на штативе электротермометр, опустив его внутрь тигля, и заполняют последний двухромокислым калием настолько, чтобы в него была погружена вся платиновая проволочка электротермометра. Для определения точки плавления двухромокислого калия следует измерять сопротивление электротермометра через определенные промежутки

времени, например, через 1–2 мин. Эти измерения производят при нагревании двухромексидного калия, затем при его плавлении и в течение некоторого времени (около 10 мин.) после того, как вся соль окажется расплавленной. После этого ток в электропечи выключают и, наблюдая процесс отвердевания соли, вновь измеряют сопротивление электротермометра через определенные промежутки времени, продолжая измерения в течение некоторого времени после того, как процесс кристаллизации будет закончен. Из результатов измерений сопротивления электротермометра вычисляют его температуру на основании формулы

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2),$$

°C, а α и β – два постоянных коэффициента ($\alpha = 3,978 \cdot 10^{-3}$ град.⁻¹, $\beta = 5,8 \cdot 10^{-7}$ град.⁻²).

Определение критической температуры жидкостей методом Надеждина. К.П. Яковлев. Работа 31 в. М.-Л. 1949. С. 83.

Равенство плотностей жидкой и парообразной фаз при критическом состоянии вещества было положено проф. Надеждиным в основу разработанного им очень точного метода определения критической температуры жидкостей. Основным элементом дифференциального дензиметра, как называл свой прибор Надеждин, была прочная стеклянная трубка с запаянными концами, один из которых несколько изогнут. Эта трубка укреплена в оправе, снабженной стальной трехгранной призмой, нижнее ребро которой опирается на стальную пластину, укрепленную горизонтально. Таким образом, этот прибор представляет собою своеобразные весы, оборудованные стрелкой и шкалой. В состоянии равновесия трубку снимают с прибора и наполняют ее приблизительно до половины исследуемой жидкостью, которую затем нагревают до кипения, поддерживая его в течение 1–2 минут. После этого отверстие в трубке быстро запаивают и вновь устанавливают трубку в приборе. Равновесие в приборе при этих условиях не может наблюдаться, т. к. жидкая фаза вследствие конструкции трубки собирается в одной части трубки, а все остальное пространство в ней будет наполнено насыщенным паром исследуемой жидкости. Но если трубку нагреть до критической температуры, то разделение жидкой и парообразной фаз исчезает, и равновесие в приборе должно вновь восстановиться. Таким образом, определение критической температуры при помощи этого прибора сводится к тому, чтобы установить ту низшую температуру, при которой в приборе впервые наблюдается восстановление равновесия.

Определение плотности пара весовым методом. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 32 в. М.-Л. 1949. С. 91.

Весовой метод применяется для определения плотности перегретых, т. е. ненасыщенных паров жидкостей, имеющих относительно невысокую точку кипения. Этот метод основан на непосредственном измерении веса определенного объема пара, температура и давление которого также определяются. Прибор состоит из стеклянного шара с узким горлышком, закрываемым очень хорошо притертым стеклянным колпачком. Вес шара вместе с колпачком точно определяется – во все вычисления эта величина входит как некоторая постоянная прибора. Шар помещается внутри масляного термостата с электрическим нагревателем. Внутри шара вводится некоторое количество исследуемой жидкости, затем

шар, не закрывая его горлышка колпачком, помещают в термостат, температуру которого устанавливают на несколько градусов выше точки кипения исследуемой жидкости. Вследствие этого жидкость внутри шара закипает, и ее пары начинают выделяться из горлышка шара. Когда этот процесс прекратится и наступит равновесие между наружным атмосферным давлением и давлением паров внутри шара, его горлышко закрывают колпачком, шар вынимают из термостата и взвешивают после того, как он охладится до комнатной температуры. После этого определяют внутренний объем шара, наполняя его дистиллированной водой и вновь взвешивая. Плотность пара $D_{t,H}$ при температуре t и барометрическом давлении H вычисляется по формуле

$$D_{t,H} = \frac{(p_1 - p)\gamma_1 + (p_2 - p)\gamma}{(p_2 - p)[1 + \beta(t - t_0)]},$$

где p – вес шара в воздухе, p_1 – вес шара, наполненного паром, в воздухе, p_2 – вес шара в воздухе, наполненного водой, t_0 – комнатная температура, t – температура термостата, γ – удельный вес воздуха при той же температуре и при том же атмосферном давлении, γ_1 – удельный вес воды при комнатной температуре, β – коэффициент объемного расширения стекла.

Определение плотности пара методом вытеснения. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 32 с. М.-Л. 1949. С. 93.

Метод вытеснения применяется для определения сильно перегретых, т. е. далеких от насыщения, паров преимущественно тех жидкостей, которые имеют относительно невысокую точку кипения. Этот метод основан на измерении веса и объема некоторого количества пара, причем для определения объема применяется так называемый *способ вытеснения*; давление и температура пара при условиях опыта также измеряются. В ходе выполнения эксперимента пар жидкости, масса которой m , оказывается в трубке, объем которой V . Вследствие этого абсолютная плотность пара при температуре t и давлении H оказывается равной $D_{H,t} = m/V$. Приводя это значение плотности пара к нормальным условиям, находят:

$$D_0 = D_{H,t} (1 + \alpha_p t) \frac{760}{H} \text{ мм.рт.ст.},$$

где α_p – коэффициент расширения газа, значение которого принимают равным $0,004 \text{ град}^{-1}$, потому что воздух внутри трубки насыщен водяными парами.

Определение скрытой теплоты парообразования жидкостей калориметрическим методом. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 35 а. М.-Л. 1949. С. 112.

Прибор состоит из водяного калориметра с крышкой, внутри которого находится металлический змеевик с расширением в нижней части. Верхний конец змеевика при помощи резиновых и стеклянных трубок соединен с кипятильником, в который наливают некоторое количество исследуемой жидкости и доводят ее до интенсивного кипения. Пары жидкости, переходя в змеевике калориметра в жидкое состояние, собираются в его расширении. Скрытая теплота па-

рообразования, выделяющаяся в змеевике при переходе пара в жидкое состояние, вызывает нагревание воды в калориметре. Приближенное уравнение теплового баланса для данного случая приводит к следующей формуле для определения скрытой теплоты парообразования λ :

$$\lambda = \frac{(M + W)(t_1 - t_0)}{m_1 - m_0} - (\tau - t_1)c,$$

где M – масса воды в калориметре, W – водяной эквивалент калориметра, t_0 и t_1 – начальная и конечная температуры калориметра, m_0 и m_1 – масса пустого змеевика и масса змеевика вместе с исследуемой жидкостью, собравшейся в нем в результате конденсации, τ – точка кипения исследуемой жидкости и c – ее удельная теплоемкость.

Определение температуры плавления и полиморфных превращений кристаллических тел. К.П. Яковлев. Физический практикум. Работа 35 в. М.-Л. 1949. С. 114.

Прибор для определения температур кристаллизации состоит из электрического нагревателя, внутри которого находится фарфоровый тигель. Внутри тигля, который заполняется исследуемым веществом, укреплен на штативе точный термометр, показания которого отсчитываются с помощью лупы. Изучение процессов плавления аморфных тел можно производить с воском, его температура плавления лежит около 50°C . Для изучения кривых отвердевания кристаллических тел можно использовать азотнокислый аммоний NH_4NO_3 , его температура плавления лежит около 160°C . При наблюдениях каждое из этих тел расплавляют в тигле, затем устанавливают термометр так, чтобы весь резервуар находился внутри расплавленного тела, и нагревают последнее на несколько градусов выше точки плавления, отсчитывая его температуру по термометру. По результатам измерений вычерчивается кривая охлаждения воска и азотнокислого аммония, и по последней кривой находят его температуру кристаллизации.

Измерение теплоты испарения жидкого азота. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. 1951. Задача 19. С. 120-123. 1953, 1955. Задача 19. С. 122-125. 1962. Задача 39. С. 190-193. 1967. Задача 57. С. 269-272.

Испарение жидкого азота производится из небольшого цилиндрического дьюаровского сосуда. Этот сосуд имеет не посеребренную вертикальную полоску, позволяющую видеть уровень жидкого газа в сосуде. Внутри сосуда находится электрический нагреватель. Испаряющийся из сосуда азот поступает через резиновую трубку в специальный газгольдер. Назначение газгольдера – в измерении количества газа, выходящего в результате испарения жидкости из дьюаровского сосуда. Теплота испарения λ жидкого азота, налитого в дьюаровский сосуд, вычисляется по формуле

$$\lambda = \frac{0,24 \cdot IVRTt}{pV\mu},$$

где I – сила тока в нагревателе, V – падение напряжения на нагревателе, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура газа, t – время на-

грева, p – давление газа в газгольдере, v – объем газа в газгольдере, μ – молекулярный вес газа.

Электрическое измерение скрытой теплоты парообразования воды. Soc. Mesure électrique de la chaleur latente de vaporization de l'eau. Sauce A. Bull. Union physicians, **1958**, 52, № 440. С. 404–406. [РЖФиз. 1959, № 3, 4759].

Описывается опыт по определению удельной теплоты парообразования воды (λ). В “термосе”, укрепленном пробкой вниз, кипит дистиллированная вода, нагреваемая помещенной в ней железоникелевой спиралью. Через пробку проходят электроды и стеклянная трубка, по которой отводится пар в холодильник. Измеряют силу тока, напряжение, время и массу испарившейся воды. В результате опыта получается $\lambda = 530\text{--}550$ кал/г.

Определение теплоты сублимации сухого льда. Bruening Leonard F. Amer. J. Phys. **1958**, 26, № 6. С. 397. [РЖФиз. 1959, № 12, 26444].

Несколько кусочков сухого льда заворачивают в бумагу, взвешивают и сразу же после взвешивания кладут в калориметр, наполовину наполненный водой. Вследствие сублимации температура воды понижается. Измерение температуры производят после того как закончится выделение пузырьков CO_2 . Температура сублимации сухого льда определяется из уравнений теплового баланса.

Определение скрытой теплоты плавления льда. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, **1959**. Работа 42. С. 128-130.

Определение скрытой теплоты парообразования. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, **1959**. Работа 43. С. 130-132.

Исследование зависимости температуры кипения воды от давления. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, **1959**. Работа 44. с. 133-134.

Измерение скрытой теплоты парообразования воды при 100°C . Гарнье. Mesure de la chaleur latente de vaporization de l'eau a 100°C . Garnier R. Bull. Union physicians. **1959**, 53, № 447. С 514-516. [РЖФиз. 1960, № 8, 18862].

Описана лабораторная работа по определению скрытой теплоты парообразования воды. На одной чашке весов устанавливается сосуд с водой и электрическим нагревателем, при помощи которого вода в сосуде доводится до кипения. Весы при этом находятся в равновесии. После того как вода закипит, равновесие весов искусственно нарушается так, чтобы чашка с сосудом перевешивала на 20 г. Замеряется время, через которое вследствие испарения воды равновесие весов восстанавливается. С учетом расходуемой в нагревателе мощности вычисляется скрытая теплота парообразования L_1 , получающаяся порядка 540–555 кал/г. Систематическая ошибка объясняется утечкой тепла. Предлагается, повторив измерение при половинной мощности нагревателя, вычислить значение L_2 . Нанеся на график значения L_1 и L_2 в функции от времени (где время откладывается по оси

абсцисс, а значение L – по оси ординат) и проведя через эти две точки прямую, получают уточненное значение теплоты парообразования L_0 , которое лежит на пересечении прямой с осью ординат.

Определение критической температуры. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. 1962. Задача 41. С. 200–202.

Используется метод А.И. Надеждина, основанный на определении критической температуры как температуры, при которой устанавливается равенство плотностей жидкости и ее пара. Для этого ампула, заполненная жидкостью и ее паром, подвешивается подобно коромыслу весов и может принимать различные положения. При нагревании ампулы жидкость будет переходить в насыщенный пар, равномерно распределяющийся в полости ампулы. Это приводит к перераспределению массы вещества в ампуле, моменты силы тяжести для правой и левой частей трубки выравниваются. При критической температуре моменты сил становятся равными, равновесие восстанавливается, ампула принимает прежнее уравновешенное положение.

Определение среднего значения теплоты испарения воды. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В.И. Ивероновой. 1967. Задача 56. С.266-269.

Основная часть установки – U – образный ртутный манометр. Одно колено манометра соединено с резервуаром воды, другое колено откачено. Манометр измеряет давление насыщающих паров воды. Резервуар с манометром помещен в сосуд с водой, температуру которой можно менять. По мере нагревания воды в резервуаре с прибором измеряется температура и давление паров воды. По полученным данным строится график зависимости давления насыщающих паров воды от температуры $p(t)$, график $\ln p = \varphi(1/T)$, а также рассчитывается среднее значение удельной и молярной теплот парообразования.

Определение температуры фазового перехода второго рода в твердом теле. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В.И. Ивероновой. 1967. Задача 58. С.272–277.

В данной задаче определяется температура фазового перехода в титанате бария (BaTiO_3), относящемуся к классу так называемых сегнетоэлектриков. При высоких температурах это вещество обладает кристаллической структурой с элементарной ячейкой в виде куба. При понижении температуры структура из кубической становится тетрагональной. Эта точка соответствует фазовому переходу второго рода или близкому к нему фазовому переходу первого рода. Температура фазового перехода в данной задаче определяется по зависимости величины диэлектрической проницаемости от температуры для поликристаллического образца титаната бария. Исследуемый образец, имеющий форму плоского цилиндра с посеребренными торцами, зажимается между латунными дисками. Диски с вложенным между ними исследуемым образцом образуют конденсатор, емкость которого измеряется при выполнении работы. Конденсатор помещается внутри печки, что и позволяет снимать температурную зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария, по острому максимуму на которой и определяется температура фазового перехода.

Усовершенствованный эксперимент по измерению скрытой теплоты плавления. Soules Jack A. Improved sophomore experiment to measure latent heat of fusion. *"Amer. J. Phys."*, 1967, 35, № 1, 23-26. [РЖФиз. 1968 3А69].

Описывается конструкция простого калориметра, наглядно демонстрирующего явление плавления льда и позволяющего определить теплоту плавления. Количество расплавленного льда определяется по изменению объема внутренней части калориметра при постоянном давлении. Точность определения составляет $\pm 1\%$. Устройство позволяет также продемонстрировать явления, связанные с эффектом переохлаждения воды. Принцип действия калориметра и методика обработки результатов понятны из приведенных иллюстраций.

Опыты с жидким воздухом и водой. Friedrich Artur. Flussige Luft+Wasser. *"Prax. Naturwiss."*, 1971, Teil I, 20, № 5, 118-119. [РЖ 1971 12113].

Следует отличать "свежий" и "старый" жидкий воздух. Удельный вес первого $0,9 \text{ г/см}^3$, второго – $1,12 \text{ г/см}^3$. Первый бесцветен, второй голубой. Второй получается из первого со временем за счет более быстрого выпаривания азота по сравнению с кислородом. Если "свежий" жидкий воздух налить в воду, он сначала плавает на поверхности, затем капли его начинают тонуть, а затем вновь поднимается на поверхность. "Старый" воздух сразу тонет, а затем ведет себя как "свежий".

Простой опыт по определению скрытой теплоты замерзания воды. Fisser Lutz. Eineifacher Versuch zur Bestimmung der Erstarrungswärme von Wasser. *"Prax. Naturwiss"*. 1973. Teil 1, 22, № 8, 217. [РЖ 1974 2А78].

В сосуд с водным раствором поваренной соли, охлажденным до $-5^\circ \div -8^\circ\text{C}$, помещается малый сосуд с 20 г. воды, имеющей температуру $20-40^\circ\text{C}$. Снимается зависимость температуры воды, а затем и льда, от времени. По наклону кривой вблизи температуры замерзания воды вычисляется поток теплоты, отнимаемый от воды. Зная последний, по продолжительности горизонтального участка кривой вычисляется удельная скрытая теплота плавления льда. Практическая работа рассчитана на учащихся средней школы.

О введении исследования изменения термодинамических функций в лабораторные работы по молекулярной физике. Кашнюк А.И., Андреева О.И. *"Тр. Новочеркасского политехнич. ин-та"*. 1974. 299, 105-111. [РЖ 1975 6А98].

Предлагается ввести исследования изменений термодинамических функций в лабораторную работу по молекулярной физике, посвященную определению удельной теплоты плавления олова.

Определение удельной теплоты парообразования воды. Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. Красникова В.И. и доц. Узикова А.Н. М., 1975. Лаб. работа № 14. С. 161-172.

Новый опыт по изучению испарения жидкости. Seus Erwin. Ein neuartiger Versuch zur Verdunstung von Flüssigkeiten. *"Prax. Naturwiss. Phys."*, 1975, 24, № 8, 205-207. [РЖ 1976 2А122].

Невооруженным глазом ход процесса испарения можно наблюдать только по уменьшению высоты жидкости. При снятии голограммы испаряющейся жид-

кости в открытом сосуде оказывается, что жидкость непрозрачна для когерентного света. Это обусловлено тем, что во всей толще жидкости происходят спонтанные флуктуации плотности, вызванные испарением с поверхности. На голограмме жидкости, кипящей в сосуде, плохо закрытом пробкой, жидкость уже частично прозрачна, а при плотно закрытом сосуде она прозрачна полностью.

Фотоэлектрический способ определения температуры отрыва капли. Schwarz Günter. Fotoelektrische Tropfpunktsbestimmung. "Prax. Naturwiss. Phys.". 1975, 24, № 2, 43–45. [РЖ 1975 9A46].

Рассматриваются практические работы, в которых момент отрыва капли вещества при плавлении определяется фотоэлектрическим методом: определение точки отрыва капли различных веществ, сравнение результатов измерений точки отрыва капли различных веществ, сравнение результатов измерений точки отрыва капли различных веществ со свойствами данных веществ. Обсуждены вопросы точности измерений, важности получения (даже приближенных) значений измеряемой величины в конкретных условиях опыта.

Исследование зависимости давления насыщенного пара от температуры и определение теплоты испарения жидкости. Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. (Учебное пособие). Одесса. 1977. Задача 17. С. 70–75.

Исследование фазового перехода 1-го рода. – Численное интегрирование. Определение параметров линейной зависимости методом наименьших квадратов. О.Б.Васильев, М.Ф. Вукс, Р.В. Григорьев и др. Физический практикум с применением ЭВМ. Выпуск 2. Ленинград. 1977. Работа № 5. С. 66-70.

Простой эксперимент с перегретыми жидкостями. Naase D.G., Davidescu A., Kerbaugh G., Eury J.L. Simple experiment on superheated fluids. "Amer. J. Phys." 1978. 46, № 8. 853-854. [РЖ 1979 5A75].

Предложен несложный эксперимент по курсу молекулярной физики: изучение условий, необходимых для перегрева жидкостей, и процесса кипения перегретых жидкостей. Стекланный цилиндрический контейнер с металлической или пластмассовой крышкой, укрепленный на металлической стойке, заполняется отфильтрованным глицерином. В дне контейнера имеется резиновая мембрана. С помощью проволочного нагревателя в столбе глицерина может быть создан значительный температурный градиент: температура глицерина измеряется ртутным термометром, который может перемещаться в вертикальном направлении (температурный градиент стабилизируется после трехчасового непрерывного нагревания). В глицерин сквозь резиновую мембрану с помощью медицинского шприца вводится по каплям смесь n-пентана с n-гексаном. Регистрируется температура, при которой возникает кипение поднимающихся вверх капель смеси (их размеры не должны превышать 1 мм, чтобы не вызвать нарушения температурного градиента). Исследуется также зависимость температуры кипения перегретой смеси «пентан-гексан» от процентного содержания в ней гексадекана.

Лабораторный эксперимент по измерению энтропии. Entropy changes. A laboratory experiment. Jordan A.D., Kalantar A.H. "Amer. J. Phys." **1979.** 47, № 6. 557-558. [РЖ 1980 1A80].

Предлагается простой лабораторный эксперимент по определению приращения энтропии для необратимого термодинамического процесса, который легко может быть реализован в рамках студенческого лабораторного практикума. Свинцовый образец, взятый при комнатной температуре, погружается в сосуд Дьюара с жидким азотом. По измеренным значениям массы образца, комнатной температуры, температуры жидкого азота, изменения массы азота вследствие выкипания при помещении образца вычисляется изменение энтропии процесса. Весь процесс разбивается на пять стадий: 1) кипение жидкого азота; 2) охлаждение образца до температуры жидкого азота; 3) нагревание выкипевшего газообразного азота до комнатной температуры; 4) охлаждение окружающего воздуха; 5) смешивание выкипевшего газообразного азота с воздухом при комнатной температуре. Для каждой стадии определяется приращение энтропии. Сумма этих приращений дает изменение энтропии для процесса в целом. Рассмотрение проводится для двух отдельных случаев: с учетом зависимости теплоемкости свинца от температуры и без учета этой зависимости.

Определение теплоты испарения жидкости. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Москва. Наука. **1983.** Работа 3.8. С. 212-215.

Эксперименты по измерению скрытой теплоты испарения и низкотемпературной теплоемкости в лаборатории общей физики. Latent heat and low-temperature heat capacity experiment for the general physics laboratory. Tompson C. W., White H. W. "Amer. J. Phys." **1983.** 51, № 4. С 362-364. [РЖ 1983 11A138].

Описаны эксперименты, проводимые в учебной лаборатории физического факультета штата Миссури г. Колумбия (США) с использованием легкодоступных приборов и оборудования, по измерению скрытой теплоты испарения (СТИ) жидкого N_2 и удельной теплоемкости (УТ) Be, C, Si, Pb. Величина СТИ определяется из экспериментов по уменьшению массы жидкого N_2 , находящегося на весах и испаряемого под действием тепла, выделяемого электрическим нагревателем. Измеряется также величина УТ указанных веществ, усредненная для диапазона температур (77÷295) К, по изменению массы жидкого N_2 за счет его испарения в результате погружения образцов данных веществ (имевших начальную температуру 295 К). Точность измерения усредненной УТ составляет ~11; 22; 1 и 3% соответственно для Be, C, S, Pb (по сравнению с табличными данными).

Лабораторная установка для определения удельной теплоты плавления, изменения энтропии и поправок Ван-дер-Ваальса. Палехин В.П., Попков Ю.А., Крупоткин М.Я., Мангушин В.А.; Ред. ж. "Изв. вузов. Физ." Томск. **1986.** 6с. (Рукопись деп. в ВИНТИ 8.10.86. №7056-В).[РЖ 1987 1A146ДЕП].

Создана лабораторная установка, позволяющая определять удельную теплоту плавления, изменение энтропии, поправки a и b Ван-дер-Ваальса. Основными узлами установки являются: игольчатый клапан, компрессор, змеевик, термостат и кювета. Получены формулы для расчета удельной теплоты плавления и изменения энтропии при плавлении. Проведенные измерения удельной те-

плоты плавления льда, поправок a и b Ван-дер-Ваальса газа фреон-12 хорошо согласуются с литературными данными.

Учебный эксперимент по изучению критических явлений. II. Кривая сосуществования жидкой бинарной смеси. Undergraduate experiment in critical phenomena. II. The coexistence curve of a binary fluid mixture. Ngubans S. B., Jacobs D. T. "Amer. J. Phys." **1986**. 54, № 6. 542-546. [РЖ 1987 3А76].

Описан учебный эксперимент для студентов, посвященный исследованию кривой сосуществования жидкой бинарной смеси, определяющей температуру, при которой происходит полное взаимное растворение двух жидких компонентов в смеси конкретного состава. Переход от частичного к полному растворению представляет собой фазовый переход второго рода. Степень смещения компонентов определяется по высоте мениска поверхности раздела жидкость-жидкость или жидкость-газ. Описаны теория метода и схема постановки эксперимента. Получены и проанализированы результаты для жидкой смеси метанол-изооктан. Определены критическая температура и состав смеси, оказавшиеся равными соответственно $(42.5 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ и $(67.3 \pm 0.2)\%$ изооктана.

Определение критических параметров жидкости. П.С. Булкин, И.И. Попова. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Изд. моск. ун-та. **1988, 1999**. Лаб. работа 4.1. С. 88–95.

В состав экспериментальной установки входят термостат, рефрактометр, вискозиметр и прибор для измерения коэффициента поверхностного натяжения. Измерения коэффициента вязкости производятся путем определения времени падения цилиндра в вискозиметре. Значения коэффициента поверхностного натяжения определяются по разности высот менисков в двух капиллярах прибора с помощью микроскопа.

Измерение теплоты парообразования и вязкости воды. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. **1988**. Лаб. работа 4.2. С. 95–100.

В эксперименте одновременно измеряются давление насыщенных паров воды, ее вязкость как функция температуры. Проверяется соотношение Бачинского, рассчитываются теплота парообразования, энергия активации и ряд других характеристик. Получаемые результаты позволяют проиллюстрировать некоторые особенности воды, связанные со способностью ее молекул к ассоциации.

Измерение теплот испарения с применением лазера. Драпкин Б.М., Руденко В.А., Карулин С.Н. Рыб. авиац. технол. инст. Рыбинск, **1991**. Деп. в фил. НИИТЭХМа г. Черкассы 03.12.91. № 500-хп91. [РЖФиз. 1992 3А98].

Описана методика экспериментального определения теплот испарения, включающая облучение образца материала серией световых импульсов лазера с фиксированным числом и продолжительностью импульсов, измерение размеров образовавшегося на поверхности образца кратера и расчет по предложенным формулам. Методика, в отличие от основанной на интегральной форме уравнений Клаузиуса-Клайперона, пригодна для определения теплот испарения непосредственно при температуре опыта.

Современные способы измерения точки росы. Korszeru harmat pont meres. Kojnok Jozsef, Toth Aftila. Energiagazdalkodas. **1992.** 33, № 2. С. 54–60. [РЖФиз. 1992-8А133].

Описаны две разработки по определению точки росы методом холодного зеркала и ИК-фотопоглощения. В первом случае температура зеркала через электронно-оптическую связь в пределах $\pm 1^\circ \text{C}$ поддерживается равной температуре протекающего над ним газового потока. Второй метод основан на эффекте резонансного поглощения ИК-излучения в твердом теле. Концентрация определяется с помощью закона Ламберта–Бира путем измерения пропускания пироэлектрическим инфрадатчиком. Точность измерений 1%.

Парадокс теплопередачи при кипении. A boiling heat transfer paradox. Lavallo G.G., Carrica P., Garea V., Jaime M. *Amer. J. Phys.* **1992.** 60, № 7. С. 593–597. [РЖФиз. 1993-8А107].

Определение теплоемкости и теплоты плавления олова. П.С. Булкин, И.И. Попова. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Изд. моск. ун-та. **1999.** Лаб. работа 2.4. С. 52–58.

С помощью калориметрической установки производится измерение теплоемкости жидкого и твердого олова и теплоты плавления олова. В процессе обработки результатов измерений осваивается методика графической обработки термограмм, полученных с помощью самописца. Изучается работа таких приборов, как потенциометр-самописец, электронагревательная печь с терморегулятором и другие приборы.

Изучение свойств воды в физическом практикуме естественнонаучных (нефизических) специальностей университета. Смирнова Т.П., Евдокимова Л. А. *ФССО-01. Шестая Межд. конф. Тезисы докл. Ярославль. Том II.* **2001.** С. 210–211.

Разработан физический практикум, включающий в себя следующие лабораторные работы. Измерение температуры термодарой. Определение молярной теплоты парообразования воды. Определение молярной теплоты плавления льда. Определение среднего значения коэффициента объемного расширения воды. Определение молярной теплоемкости воды. Исследование температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения воды методом Ребиндера. Исследование температурной зависимости вязкости воды с помощью капиллярного вискозиметра. Наблюдение конвекционных потоков в приборе Хоупа. Получение переохлажденной воды. Кристаллизация льда из переохлажденной воды. В каждой из этих лабораторных работ имеется возможность обсуждения свойств воды и льда, моделей структуры жидкого и твердого состояний, фазовых переходов, структуры молекулы H_2O , особенностей водородных связей, характера колебаний атомов кислорода и водорода и влияния его на теплоемкость воды и льда, сравнения свойств молекулы H_2O и ее конденсированных состояний со свойствами других представителей гомологического ряда молекул (H_2O , H_2S , H_2Se , H_2Te).

Учебно-лабораторные разработки в условиях минимума лабораторного оборудования (I). Матюкин В.В. Физ. образ. в вузах. **2002.** 8, № 3. 42–49, 109. [РЖ 03.05-18А.144].

Представлена учебная лабораторная работа по курсу молекулярной физики, позволяющая на простейшем оборудовании экспериментально определить не только удельную теплоту испарения жидкости, но также коэффициент теплоотдачи, энергию излучения и теплоемкость системы. Это становится возможным в результате более глубокой математической обработки экспериментальных данных. В процессе работы осваивается программа обработки экспериментальных данных (Excell, Mathcad или другие).

Определение температуры и удельной теплоты плавления твердого тела с использованием датчика температуры, соединенного с компрессором. Determination of melting temperature and heat of fusion of a solid using a computer-interfaced temperature probe. Jogad M.S., Van Domelen D., Westfall G., Benenson W., Mahant S.D. *Amer. J. Phys.* **2002**. 70, №1. 89-91. [РЖ03.03-18А.153].

Изучение межфазных явлений на границе раздела магнитных и немагнитных жидкостей. Скроботова Т.В., Власенко И.А. *Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения. Седьмая Всеросс. конф.* Глазов. **2002**. С. 21.

Разработана демонстрация для изучения действия сил поверхностного натяжения на границе раздела сферической капли магнитной жидкости, взвешенной в немагнитной прозрачной жидкости. Предлагается электронная версия демонстрации.

Наблюдение бифуркационного перехода в конвективном потоке воздуха. А.Н. Трусевич, А.П. Пятаков. *Физ. образ. в вузах.* **2003**. Т. 9. № 2. С. 96-102.

Предлагается простой эксперимент, позволяющий методом измерения горизонтального распределения температур на различных высотах над источником тепла (электрической плиткой) наблюдать сложный эффект неравновесной термодинамики – организацию потока нагретого воздуха в две различные пространственные структуры, разделенные областью неустойчивого состояния, соответствующей точки бифуркации.

Испарение капли ртути. The evaporation of a drop of mercury. Winter Th. G. *Amer. J. Phys.* **2003**. 71, № 8. 783-786. [РЖ 05.01-18А.142].

Приближённое определение критической температуры жидкости с помощью измерения поверхностного натяжения в зависимости от температуры. The approximate determination of the critical temperature of a liquid by measuring surface tension versus the temperature. Maroto J.A., de las Nieves F.J., Quasada-Peres M. *Eur. J. Phys.* **2004**. 25, № 2. 292-301. [05.06-18А.138].

Исследование теплоемкости и теплоты парообразования воды в лабораторном практикуме по физике. Андреева А.Г., Борисова Е.А. *Школа и вуз: достижения и проблемы непрерывного физического образования: Сборник научных трудов 4 Российской научно-методической конференции учителей школ и преподавателей вузов.* Екатеринбург, **2006**. Екатеринбург.2006.143–147. [РЖ 07.10-18А.132].

Теоретическая часть работы содержит общие сведения о процессе парообразования при кипении жидкости, нагретой жидкости и переохлажденном паре. Экспериментальная часть включает описание лабораторной установки, ее характеристик и конкретных физических задач: 1) исследование теплоемкости, мощности и других характеристик установки; 2) определение теплоемкости и теплоты парообразования воды; 3) расчет изменения энтропии в ходе парообразования воды при ее кипении.

Измерение давления пара в закрытой системе. Vapor pressure measurements in a closed system. Jannone Mark. *J.Chem.Edu.* **2006.** 83. № 1. 97-98. [РЖ 07.03-18А.135].

Дано описание метода, альтернативного общепринятому, в котором используется простая аппаратура для измерения давления пара в зависимости от температуры в закрытой системе. Общее давление является давлением пара жидкого образца. Аппаратура относительно недорогая (200 долларов), но требует создания вакуума с ловушкой, охлаждаемой жидким азотом.

Исследование фазового перехода первого рода в лабораторном практикуме по физике. Андреева А.Г., Борисова Е.А. *Школа и вуз: Сборник научных трудов 4 Российской научно-методической конференции учителей школ и преподавателей вузов.* Екатеринбург, **2006.** Екатеринбург.2006.1112-115. [РЖ 07.10-18А.147].

На базе лабораторного комплекса ЛКТ, позволяющего проводить исследования теплофизических характеристик различных веществ, поставлена экспериментальная лабораторная работа «Исследование фазового перехода первого рода на примере плавления твердых тел», а также созданы методические указания к ней. Экспериментальная часть методических указаний включает описание лабораторной установки, конкретных задач, методик измерений и обработки результатов. Лабораторная работа позволяет исследовать температурную зависимость теплоемкости твердого тела и энтропии вблизи фазового перехода; определить температуры плавления и кристаллизации, удельную теплоту плавления и кристаллизации легкоплавких веществ, приращение энтропии при нагревании и плавлении; а также сравнить температуру образца при нагревании и охлаждении для твердых и аморфных тел. При выполнении обработки результатов эксперимента рекомендуется пользоваться программами (например: MathCAD, Mat lab, Maple)

Легкий учебный эксперимент по переохлаждению воды. An easy classroom experiment on the supercooling of water. Gianino Cancetto. *Phys. Educ.* **2007.** 42, № 3. 289-292. [РЖ 09.03-18А.95].

Использование элементов Пельтье при изучении фазовых переходов твердое тело–жидкость–пар и сверхохлаждения. Using Peltier cells to study solid-liquid-vapour transitions and supercooling. Torzo G., Solelta I., Branca M. *Eur. J. Phys.* **2007.** 28, № 3. С. 13-27. [РЖ 08.08-18А.132].

Флуктуации вблизи фазовых переходов в жидких кристаллах. Fluctuations near a phase transition in liquid crystals. Moses Thomas, Reeves Jason, Pirondi Paulo. *Amer. J. Phys.* **2007.** 75, № 3, 220-223. [РЖ 09.02-18А.116].

Глава 8

ПОВЕДЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Определение высоты с помощью барометра. Фон Юй. *Ули Тумбао*, 1954. №10, 636-637. [РЖ-1955 №6. 10666].

Определение числа Авогадро. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. 1962. Задача 48. С. 235-239. Задача 60. 1967. С.284-288.

В качестве исследуемого объекта используется эмульсия канифоли в воде или в растворе спирта и воды. Кювета с эмульсией помещается на столик микроскопа. После подсчета числа частиц на данном уровне h_1 микрометрическим винтом перемещают микроскоп на 40–50 мкм и производят счет числа частиц на уровне h_2 . Определяется также средний радиус частиц. С учетом некоторых поправок, обусловленных условиями эксперимента, число Авогадро вычисляется по формуле

$$N = \frac{3RT \ln(n_1/n_2)}{4\pi r^3 (\rho - \rho_0) g \cdot 0,89(h'_2 - h'_1)},$$

где n_1 и n_2 число частиц на первом и втором уровнях соответственно, R – универсальная газовая постоянная, T – температура, r – радиус частиц, ρ – плотность вещества частиц, ρ_0 – плотность среды.

Ознакомление со статистическими закономерностями на механических моделях. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. 1962. Задача 50. С. 247–256. М. 1967. Задача 64. С.316–324.

Изучение закона нормального распределения ошибок проводится на механической модели, воспроизводящей картину случайных отклонений от среднего положения частиц в результате суммирования большого числа равновероятных элементарных ошибок. Сыпучий материал (например, пшено) из воронки просыпается через ряд сеток, отклоняющих частицы от вертикального направления. Рассеянное зерно, собираясь в ящике с узкими ячейками, дает представление о характере распределения случайных отклонений от вертикали.

Для знакомства с законами распределения, аналогичными закону Максвелла (закону распределения молекул по скоростям), служит механическая модель, осуществляющая двумерное рассеивание частиц. Круглая воронка направляет поток зерна на ряд металлических сеток диаметром 30 см с квадратными ячейками 7×7 мм². Сетки расположены на расстоянии 1 см друг от друга по вертикали таким образом, чтобы узлы каждой сетки приходились над центрами отверстий предыдущей. Зерно, просыпаясь через сетки, рассеивается по всем направлениям в плоскости, параллельной плоскостям сеток, и образует распределение, подобное распределению точек попадания пуль при стрельбе в мишень. Непосредственно под сетками располагается серия концентрических вертикальных цилиндров с радиусами 1, 2, 3, ..., 15 см. Так как дно цилиндров скошено, то все зерна, попавшие в тонкий цилиндрический слой между двумя соседними цилиндрами, ссыпаются вместе и поступают в отдельные ячейки ящика с прозрач-

ными стенками. Каждый цилиндрический слой осуществляет, таким образом, суммирование всех случайных отклонений определенной величины независимо от направления этого отклонения. Полученное в результате этого распределение аналогично распределению Максвелла для скоростей двумерного газа

$$\Delta n(u) = Ne^{-u^2/2u_B^2} \frac{u\Delta u}{u_B^2}$$

К вопросу о проведении лабораторных работ в курсе молекулярной физики. Летунов Н.А. “Уч. зап. Перм. гос. пед. ин-т.” 1969. 72. 63-66. [РЖ 1971 12A95].

Описана лабораторная работа “Ознакомление с некоторыми понятиями статистической физики и методом Монте-Карло”, которая введена в лабораторный практикум по молекулярной физике для студентов II курса Вологодского пединститута с целью более осмысленного выполнения студентами двух других работ практикума, а именно, “Проверка закона Гаусса” и “Изучение двумерного распределения Максвелла”.

Эксперимент по измерению постоянной Больцмана. Horne Michael, Farago Peter, Oliver John. An experiment to measure Boltzmann's constant. “*Amer. J. Phys.*”, 1973. 41, № 3. 344-348. [РЖ 1973 8A67].

Приведены технические детали задачи общего физического практикума по измерению постоянной Больцмана методом Ж. Перрена. Использовалась взвесь частиц полистирола диаметром $1,011 \pm 0,005$ мм и плотностью $1,053 \pm 0,0044$ г/см³. При температуре 295 К концентрация частиц этой взвеси в жидкости уменьшается в e раз через 14,5 мк. Использование вместо воды раствора глицероля в воде позволяет увеличить последнюю величину до 27,4 мк. Слой суспензии толщиной 130–170 мк помещается под покровным стеклом, приклеивающимся цементом, не растворимым в жидкости суспензии. Наблюдение ведется при объективе (40÷43)× и окуляре 10×. Подсчет частиц ведется как непосредственно, так и с помощью микрофотографий. Полученные значения постоянной Больцмана отличаются от принятого не более чем на 20 %. Авторы предполагают исследовать зависимость получаемых значений постоянной Больцмана от плотности жидкости и суспензии, размера частиц и температуры. Изготовленные препараты годны для исследования поступательного броуновского движения.

Изучение распределения Максвелла по скоростям для термоэлектронов в практикуме по общей физике. Мансуров А.Н., Смирнова О.А. “*Изв. высш. учеб. заведений. Физика*”, 1974, № 8, 145-146. [РЖ 1975 2A113].

Описание работы п физическому практикуму по экспериментальному установлению зависимости распределения термоэлектронов, эмиттируемых катодом пентода 6П9, по энергиям. Между управляющей и второй сетками создается запирающее поле (до 10 В), а между анодом и третьей сеткой создается разность потенциалов такая, чтобы все термоэлектроны, кинетическая энергия которых превышает разность потенциалов запирающего поля, попали на анод. Тогда зависимость тока в анодной цепи от запирающего поля дает функцию распределения термоэлектронов по их скоростям. Схема включения позволяет свести к минимуму влияние изменения разности потенциалов между управляющей и первой

сетками на плотность электронов в околоскатодном пространстве. Поэтому плотность распределения электронов по скоростям совпадает с максвелловским распределением для электронов, скорость которых не превышает удвоенную моду распределения.

Статистика экспериментальных ошибок. Физический практикум. Учебное пособие. Под ред. Горониной К.А. и Любиной А.Г. Часть III. Горький, 1975. Лаб. работа. С. 5–17.

Статистика импульсов напряжения шумового генератора. Законы Пуассона и Гаусса. Физический практикум. Учебное пособие. Под ред. Горониной К.А. и Любиной А.Г. Часть III. Горький, 1975. Лаб. работа. С. 18–28.

Определение постоянной Больцмана. Lee Edward V. Determination of Boltzmann's constant. "Phys. Teacher", 1975, 13, № 5, 305. [РЖ 1975 10А74].

Предлагается простой прямой метод определения постоянной Больцмана путем измерения объема углекислого газа, образующегося при возгонке твердой углекислоты (сухого льда). Сублимированный CO_2 собирается в широкогорлой бутылки над водой, насыщенной CO_2 во избежание растворения части газа. Потери CO_2 при переносе с чашки весов в воду можно оценить, если сразу же вернуть образец на весы и снова взвесить его. Необходимо учесть отличие давления CO_2 внутри бутылки от атмосферного из-за разности уровней воды, а также из-за давления насыщающих паров воды. Точность измерения оказывается $\sim 10\%$.

Эксперимент по элементарной статистике. Fernando P.C.V. Experiment in elementary statistics. "Amer. J. Phys." 1976. 44, № 5. 460-463. [РЖ 1976 11А114].

Описан трехчасовой лабораторный эксперимент по элементарной статистике, рассчитанный на студентов физических, медицинских, психологических и других факультетов университетов и колледжей и не требующий от них предварительных знаний по статистике. Эксперимент состоит в измерении длины гвоздей и статистической обработке результатов измерений. Каждая пара учащихся замеряет длину 100 гвоздей и результат измерений записывает в таблицу, а затем строит гистограмму распределений, определяет среднее значение, стандартное отклонение, строит кривую распределения и т. д. Отмечается, что описываемая методика проведения эксперимента позволяет познакомить учащихся с понятиями случайной выборки, генеральной совокупности, получить аналитический вид и проверить эмпирически различные аспекты гауссовского распределения случайной величины.

Измерение скорости молекул газа. Janovic Jozof. Meranie rychlost, molekuly plynu. "Mat. a fyz. Sk.", 1977. 8, № 2. 130-137. [РЖ 1978 7А94].

Даются упрощенные описания наиболее известных опытов по определению скорости молекул газа (опыты Штерна, Ламмерта и др.).

Определение размера молекул и числа Авогадро для студентов вузов. Alexandrakis George C. Determination of molecular size and Avogadro's number: a student experiment. "Amer. J. Phys." 1978. 46. № 8. 810-812. [РЖ 1979 4А116].

Описан несложный лабораторный эксперимент для студентов вузов по курсу молекулярной физики: определение размеров молекул, числа Авогадро и постоянной Больцмана. Даны теоретические основы эксперимента, базирующиеся на элементарной кинетической теории газов. Работа предполагает выполнение двух отдельных экспериментов. В первом эксперименте определяется средняя длина свободного пробега λ для газообразного йода при диффузии паров йода в воздух при 100°C как функция времени. Во втором эксперименте определяется изменение объема малого количества (от 1 до 1,5 г) сухого льда при сублимации при комнатной температуре (что дает величину $D^3/d^3 = C_{\text{exp}}$, где D – усредненное расстояние между центрами молекул двуокиси углерода в газообразном состоянии при комнатной температуре, d – диаметр молекулы). Размеры молекул оцениваются по формуле $\lambda = C_{\text{exp}} d / \pi$. Описаны экспериментальные установки, методика проведения эксперимента. Обсуждаются результаты эксперимента, которые находятся в приемлемом согласии с литературными данными.

Изучение статистики пуассоновского распределения. A study of the statistics of Poisson distributions. MacLeod A.M. “*Eur. J. Phys.*”. 1980. 1. № 2. 88-97. [РЖ 1981 4A145].

Описан лабораторный эксперимент, в котором изучается распределение Пуассона. Эксперимент состоит в определении числа случайных событий за определенные интервалы времени, в вычислении характеристик распределения и сравнении их с теоретическими. Генератором случайных событий в эксперименте служит источник α частиц, регистрация которых осуществляется поверхностно-барьерным детектором, для обработки и анализа экспериментальных данных используется микро-ЭВМ. В составе аппаратуры имеется также схема регулировки мертвого времени, системы регистрации и дисплей для отображения результатов анализа в графической форме. Максимальная скорость счета достигает 10^4 событий/сек. Аппаратура позволяет получать на экране дисплея одновременно как экспериментальные, так и теоретические кривые пуассоновского распределения случайных событий и его основных характеристик. Возможно также проведение анализа влияния изменения мертвого времени аппаратуры на параметры распределения. Приводятся технические данные аппаратуры, блок-схемы установки и отдельных ее узлов.

Распределение Максвелла для электронного газа в лабораторном практикуме. Годованец Л.Ю. *Ред. ж. “Изв. вузов. Физ.”* Томск, 1987. 7с. [РЖ 1988 1A113ДЕП]

Разработана лабораторная работа экспериментального построения графика распределения Максвелла для электронного газа, полученного в баллоне радиолампы. В основание метода поставлено исследование изменения анодного тока лампы в зависимости от величины электродвижущей силы в радиолампе и от приложенного отрицательного напряжения к аноду лампы. Отличия от распределения Максвелла для нейтрального газа незначительны и вполне приемлемы для лабораторной работы. Простота установки и методики предоставляют широкие возможности в лабораторной практике по общему курсу физики.

Изучение статистических закономерностей на механических моделях. П.С. Булкин. Под ред А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. *Общий физический практикум. Молекулярная физика.* М. 1988, 1999. Лаб. работа 7.1. С. 183–186.

Изучаются биномиальное, нормальное и двумерное распределения. Оборудование работы состоит из двойной доски Гальтона с разным числом рассеивающих центров и прибора для осуществления двумерного распределения, также со сменным числом рассеивающих сеток.

Изучение распределения Больцмана. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. **1988, 1999.** Лаб. работа 7.2. С. 186–190.

Оборудование работы состоит из электромеханической модели с пьезоэлектрическим датчиком, источников питания, осциллографа и частотомера. Целью работы являются изучение распределения Больцмана на электромеханической модели и получение из эксперимента основных закономерностей: распределения частиц в поле силы тяжести, измерения средней энергии частиц при тепловом движении, проверки углового распределения скоростей частиц.

Изучение случайных блужданий. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. **1988, 1999.** Лаб. работа 7.3. С. 190–193.

Оборудование работы состоит из электромеханической модели, имитирующей случайные движения частицы, источника переменного напряжения и секундомера. Целью работы является приложение статистических законов, описывающих броуновское движение, к случайным блужданиям тела, обусловленным большим числом случайных воздействий.

Моделирование статистических распределений на ЭВМ. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. **1988, 1999.** Лаб. работа 7.4. С. 193–197.

Целью работы являются моделирование на ЭВМ прямоугольного распределения и моделирование функции плотности для суммы двух, трех и шести случайных величин, каждая из которых распределена прямоугольно. Иллюстрируется переход к нормальному распределению при увеличении числа слагаемых. Рассматривается модель распределения Максвелла по абсолютной величине скорости. Оборудование работы состоит из вычислительного комплекса МЕРА-60. В состав комплекса входят следующие приборы: центральный процессор (ЦП), накопитель на гибких магнитных дисках (ГМД), алфавитно-цифровой дисплей (АЦД), цветной графический растровый дисплей (ЦРД), интерфейсные платы для связи ЦП с периферийными устройствами. Программа работы записана на языке ФОРТРАН на гибкий магнитный диск и перед работой вводится в память ЭВМ. После ввода программы дальнейшего общения ЦП и ГМД не происходит. Отдельные задания работы могут выполняться независимо друг от друга. Предусмотрен диалоговый режим работы.

Определение числа Авогадро (экспериментальная работа). Determination of Avogadro's number (an experiment). Salem S. I., Boughter-Cardin T., Civaleri M. T., Leonard J. W., Schreiman R. A., Williams G. A. *Amer. J. Phys.* **1988.** 56, № 5 С. 466–467. [РЖ 1989 1A122]

Дано краткое описание лабораторной работы, которая была выполнена группой студентов, по определению с достаточно высокой степенью точности

числа Авогадро N_A . Установка состоит из рентгеновского источника, брегговского монокристаллического спектрометра и детектора. Для калибровки использован кристалл кальцита. Приведен конкретный пример вычисления N_A при исследовании дифракции на кристалле меди. Полученные значения $N_A = (6,0226 \pm 0,001) \cdot 10^{-23}$ атомов/моль хорошо согласуется с известной из литературы величиной.

Измерение температуры электронов в плазме. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988. Лаб. работа 7.6. С. 200–206.

Распределение термоэлектронов по энергиям. П. С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988, 1999. Лаб. работа 7.5. С. 197–200.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение распределения термоэлектронов по энергиям методом задерживающего потенциала. Оборудование работы состоит из электронной лампы (пентод 6П9) с оксидным катодом, стабилизированных источников питания, микроамперметра и вольтметров.

Сетки и анод пентода 6П9 представляют собой коаксиальные цилиндры, на оси которых расположен катод. Радиус катода значительно меньше радиуса анода. При эмиссии с катода из чистого металла электроны имеют близкое к максвелловскому распределение по скоростям и соответственно по энергиям. Из экспериментальных измерений силы тока анода в зависимости от величины задерживающего потенциала можно, например, определить температуру электронов. В многосеточных лампах с оксидным катодом электроны испытывают действие многих факторов: поле сеток лампы, микрополе на поверхности оксидного катода, пространственный заряд вблизи катода и др. Все эти факторы влияют на распределение электронов, которое уже нельзя считать максвелловским. Меньше всего влияют различные искажения на быстрые электроны. Поэтому можно считать, что для быстрых электронов сохраняется то распределение, которое имело место при выходе электронов из катода. Так, быстрые электроны сохраняют информацию о первичном распределении при температуре, соответствующей температуре катода.

Лабораторный эксперимент по определению константы Больцмана. Boltzmann's constant: a laboratory experiment. Kruglak Naum. *Amer. J. Phys.* -1989. – 57, № 3. С. 216-217. [РЖ 1990 2А98]

Описана методика и результаты лабораторного определения константы Больцмана в процессе обучения курсу общей физики. Для этого сочетанием микроскопической, компьютерной и телевизионной и техники создан аппаратный комплекс, позволяющий наблюдать за броуновским движением 1,1-мкм латексных микросфер на экране телемонитора. Электронный таймер подает звуковой сигнал через определенные промежутки времени (15 и 30 с), с тем, чтобы можно было фиксировать пространственно-временные положения наблюдаемой микросферы. Далее после многократных случайных блужданий определяется среднее квадратичное смещение броунирующей частицы и по формуле Эйнштейна с учетом вязкости жидкости, ее температуры и размера частиц опреде-

ляют искомую компоненту. При числе случайных блужданий от 50 до 500 ошибка определения находится в пределах от 5 до 7%. Помимо своего первоначального назначения – разнообразить процесс обучения – созданный комплекс полезен для постановки многочисленных задач по молекулярной динамике жидкостей и растворов.

Определение постоянной Больцмана. Определяне константата на Болцман. Иванов Д. *Физик.* – 1990. – 15, №5. – С.13-15. [РЖ 1991 12A111]

Установка для экспериментального определения постоянной Больцмана состоит из стеклянного сосуда с двумя отверстиями, плотно закрытыми пробками. Через верхнюю пробку пропущена стеклянная пробка, которая соединяется с коленом водяного манометра. Через эту же пробку пропущен термометр. В сосуд насыпают бикарбонат натрия, а затем наливают водный раствор уксусной кислоты. В процессе реакции выделяется углекислый газ, парциальное давление которого измеряется манометром. Зная исходную массу бикарбоната натрия и его молярную массу, определяют число его молекул. Затем, пользуясь уравнением Клапейрона-Менделеева, вычисляют постоянную Больцмана. Даны советы по проведению эксперимента.

Распределение молекул по скоростям при больших числах Кнудсена. Molekular velocity distribution at large Knudsen numbers. Sitschin W., Reich G. *J. Vac. Sci and Technol. A.* 1991. 9, № 5. С. 2752-2756. [РЖФиз. 1993-6A65].

Проведена проверка применимости максвелловского распределения скоростей газовых молекул в вакуумной метрологии при больших числах Кнудсена, т. е. в молекулярном режиме (высокий и сверхвысокий вакуум). Используются экспериментальные результаты, полученные с помощью стандартов статического и динамического расширения и включающие вычисления на основании распределения Максвелла. Результаты сравниваются между собой, а также с полученными при прямых измерениях давления жидкостным манометром. Сравнение показывает хорошее (с неопределенностью менее 1 %) согласие вычисленных и измеренных значений, свидетельствуя о том, что в обычной вакуумной метрологии распределение Максвелла обеспечивает хорошую точность и в молекулярном режиме.

Определение числа Авогадро из упругих характеристик твердых тел. Avogadro constant descending from the elastic data for solids. Olszewski S. *Z. Phys.B* – 1995.– 97, №1 – С. 95-101. [РЖ 1995 10A43]

Изучение статистических закономерностей теплового движения молекул. А.В. Ельцов, Н.В. Коненков. *Преп. физики в высш. шк. Сб. науч. тр.* № 11. 1997. С. 26–30.

Исследуются статистические закономерности теплового движения молекул с помощью модели упругих шаров. Рассматривается движение N шаров единичной массы и диаметром d в двумерном сосуде со сторонами единичной длины. Получены распределения ограниченного числа частиц по скоростям и флуктуаций концентрации с помощью метода компьютерного моделирования.

Компьютерная интерпретация максвелловского распределения в идеальном газе. Б.А. Барихин, А.В. Никитин, В.В. Ступакова. *Физ. образ. в вузах.* 1998. Т. 4. № 2. С. 79-89.

С момента возникновения кинетическая теория идеального газа строилась на представлении о дискретном строении газа как физического тела, и беспорядочном движении образующих его дискретных частиц. Чтобы создать “физику дискретности”, то есть дать общий и точный способ количественного описания движения этих частиц, приходится пользоваться статистическими данными и вычислительными методами теории вероятности. Перечисленные особенности кинетической теории позволяют успешно применять для моделирования кинетических процессов вычислительную технику. Наглядность и возможность визуализации результатов на любой стадии процесса установления максвелловского распределения в работе обеспечиваются непротиворечивостью логической схемы при включении в нее методов теории вероятности.

Установка для изучения распределения частиц в поле силы тяжести. Яблочков Е.Ю., Попов С.Е. *Учеб. физ.* 1999. № 3. 28-31, 79. [РЖ 2000 18А118].

Если через кювету с хаотически движущимися стальными шариками пропускать свет и регистрировать ослабление сигнала (вызываемое перекрытием шариками светового пучка) на различной высоте, то можем получить количественную характеристику распределения концентрации шариков по высоте. Установка может быть полезной при изучении равновесного состояния идеального газа.

Немаксвелловские функции распределения и их изучение в общем физическом практикуме. Булкин П.С., Миронова Г.А. *Физ. образование в вузах.* 1999. 5, №2. 124-129. [РЖ 00.05-18А.141].

В физическом практикуме физического факультета МГУ собрана установка для измерений функций распределения электронов по энергиям в многосеточной лампе. Термоэлектроны, выходящие с катода, подвергаются воздействию пространственного заряда, контактной разности потенциалов и других факторов. Измерения ведутся методом задерживающего потенциала. Этот метод не только позволяет получать функции распределения при различных пространственных зарядах, но и оценивать величину потенциального барьера у катода, температуру, среднюю энергию и среднюю концентрацию термоэлектронов.

Изучение плазмы в общем физическом практикуме. Булкин П.С., Миронова Г.А., Малова Т.И. *Физ. образ. в вузах.* 2001. 7, № 4. 70–76. [РЖ 02.12-18А166].

Знакомство студентов с плазмой в курсе общей физики, как правило, связано с изучением статистических законов, а также газокинетических и газодинамических процессов в плазме. Одним из наиболее распространенных методов исследования свойств плазмы является метод зондов, предложенный Ленгмюром. В общем физическом практикуме физически наглядно дается интерпретация вольтамперных характеристик (ВАХ) лишь в случае одного зонда. На практике же применяются как однозондовый, так и двухзондовый методы. Причем двухзондовый метод более предпочтителен, так как в нем используются небольшие зондовые токи и нет опасности перегрева зондов, их распыления. В данной работе приводится: 1) методика графического построения ВАХ и вы-

вод ее аналитической зависимости; 2) метод определения температуры и средней энергии, приходящейся на один электрон в плазме, из полученной экспериментально двухзондовой ВАХ.

Модель взаимодействующих диссипативных электростатических осцилляторов для демонстрации и изучения основных закономерностей статистической термодинамики. Грабов В.М., Дивин Н.П. *ФССО-01. Шестая Межд. конф. Тез. докл. Том II. Ярославль. 2001.* С. 148-149.

Целью данной работы является обоснование возможности построения макроскопической модели ансамбля, который подчиняется закономерностям статистической термодинамики, для изучения и демонстрации этих закономерностей. Элементами системы являются диссипативные электростатические осцилляторы в виде, например, электропроводящего шарика, подвешенного на электроизолирующей нити и помещенного между вертикально расположенными пластинами конденсатора. При постоянном напряжении на пластинах конденсатора шарик на нити будет совершать незатухающие колебания с перезарядкой при ударах о пластины конденсатора и переносом тока. Диссипативность процесса обусловлена тем, что получаемая за половину периода энергия переходит во внутреннюю при ударах шарика о пластины. Но постоянство средней механической энергии колебательной системы делает ее аналогом изолированного консервативного осциллятора. Взаимодействующая система электростатических осцилляторов реализована в виде электропроводящих шариков, помещенных в прозрачную кювету в форме прямоугольного параллелепипеда, верхняя и нижняя грани которой являются проводящими. При подаче напряжения свыше определенного порогового шарик совершают периодические движения между верхней и нижней гранями. При движении они сталкиваются друг с другом, в результате чего появляются также горизонтальные составляющие импульса, и при условиях, когда средняя длина свободного пробега частицы становится меньше высоты кюветы, в системе устанавливается стационарное статистическое состояние, эквивалентное состоянию системы взаимодействующих консервативных осцилляторов, что подтверждается серией экспериментов, в частности, давлением, оказываемое на стенки сосуда, пропорционально концентрации частиц и их средней кинетической энергии, как это следует из классической молекулярно-кинетической теории.

Изучение распределения частиц в гравитационном поле Земли. Шапочкин М. Б. *Физ. образ. в вузах. 2002.* 8. № 3. 27-32. [РЖ 03.05-18А.143].

Экспериментальное исследование статистических законов распределения частиц в равновесных системах – обязательная составляющая учебного процесса при изучении общего курса физики. В настоящее время известны несколько версий лабораторной работы по исследованию распределения термоэлементов, близкого к максвелловскому, однако удачных версий исследования распределения Больцмана имеется немного. Излагается оригинальный метод исследования поведения частиц жидкости, полученных методом ультразвуковой кавитации, в гравитационном поле Земли. Для кавитации используется ультразвуковой генератор. Дана схема лабораторной установки, конструкция которой позволяет реализовать несколько лабораторных работ различной сложности, в том числе провести оценочные измерения коэффициента диффузии частиц воды, и полу-

чить теоретическое обоснование расчетных соотношений, положенных в основу обработки результатов измерений. Работа рекомендуется в качестве методической поддержки раздела «Статистическая физика» общего курса физики вузов.

Экспериментальная оценка подвижности ионов в воздухе. Шеффер Н.И., Кузнецов И.С., Филатов В.М. *Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения. Седьмая Всеросс. конф.* Глазов. **2002.** С. 21.

В физических практикумах отсутствуют работы, связанные с определением подвижности ионов в газе. Предлагается лабораторная работа по определению подвижности ионов в воздухе путем измерения скорости электрического ветра терморезисторным анемометром.

Лабораторные работы по статистической физике. Гуров Б.М., Чеботарев С.Н. *Учебные эксперименты в высшей школе.* **2003.** № 2. 42-44. [РЖ 04.04.-18А.149].

Предлагаются две лабораторные работы, позволяющие изучить основные понятия статистической физики в рамках общего курса физики. В работах изучается угловая зависимость вероятности обнаружения математического маятника и функция распределения молекул по высоте.

Лабораторная работа “Изучение распределения Максвелла”. А.А. Босенко, В.И. Богданов. *Совр. физ. практикум. Труды VIII Межд. уч.-методич. конф. Москва.* **2004.** С. 77-78.

Исследуется распределение термоэлектронов по скоростям с помощью магнетрона. Установка представляет собой соленоид, внутри которого помещен вакуумный диод с регулируемым током накала. При движении электронов в магнитном поле соленоида на них действует сила Лоренца, величина которой пропорциональна скорости, и термоэлектроны начинают двигаться по дуге окружности, радиус кривизны которой пропорционален скорости и зависит от индукции. Когда радиус кривизны станет меньше радиуса анода, электроны не достигнут анода. При постепенном увеличении индукции магнитного поля отсекаются электроны, скорости которых ниже критической, а это приводит к уменьшению анодного тока вплоть до полного исчезновения. Таким образом получают зависимость анодного тока от тока соленоида. Проведя графическое дифференцирование, получаем зависимость распределения термоэлектронов по скоростям, причем максимум распределения сдвигается в сторону увеличения скорости при увеличении температуры катода. Данная работа дает наглядное представление о свойствах распределения Максвелла и позволяет студенту получить наглядное представление о законах классической статистической физики.

Распределение термоэлектронов по скоростям. С.А. Козловский. *Совр. физ. практикум. Труды VIII Межд. уч.-методич. конф. Москва.* **2004.** С. 91.

Изучение распределения термоэлектронов по скоростям в студенческом практикуме обычно проводится методом задерживающего потенциала. В настоящей работе предлагается вести подсчет электронов с помощью метода магнетрона. При отсутствии магнитного поля электроны, вылетающие из ка-

тогда, летят по радиусам к аноду. При наличии тока в соленоиде в нем создается магнитное поле, которое будет направлено перпендикулярно вектору скорости электронов. Это вызовет возникновение силы Лоренца, которая будет искривлять траекторию электронов. При увеличении магнитного поля радиус кривизны уменьшается, и некоторые электроны не будут попадать на анод, и анодный ток уменьшится. При значении тока соленоида I_{c1} на анод будут попадать только электроны, обладающие скоростями, большими V_1 . Значение скорости электрона связано с величиной тока соленоида соотношением $V = A_{уст} \cdot I_c$, где $A_{уст}$ – коэффициент, зависящий от параметров установки. При другом значении тока соленоида I_{c2} на анод будут попадать только электроны, обладающие скоростями, большими V_2 . Разность анодных токов пропорциональна числу электронов, обладающих скоростями в интервале от V_1 до V_2 . Таким образом можно получить функцию распределения электронов по скоростям.

Тиратрон как генератор низкотемпературной плазмы. Булкин П.С., Миронова Г.А., Малова Т.И. Физическое образование в вузах. **2005.** 11, № 3. 64–67.145. [РЖ 06.05-18A159].

Плазма – перспективный объект для изучения разнообразных физических явлений и законов, их описывающих: кинетики нейтральных и заряженных частиц, законов распределения частиц плазмы по энергии, диффузии и других. Знакомство студентов с плазмой в курсе общей физики, как правило, связано с изучением статистических законов, а также кинетических и газодинамических процессов в плазме. Одним из наиболее распространённых методов исследования свойств плазмы является метод зондов, предложенный Ленгмюром. В общем физическом практикуме наглядно даётся интерпретация вольтамперных характеристик (ВАХ) лишь в случае одного зонда. На практике же применяются как однозондовый, так и двухзондовый методы. При этом двухзондовый метод более предпочтителен, т. к. в нем используются небольшие зондовые токи и нет опасности перегрева зондов, их распыления. В данной работе приводится методика графического построения ВАХ для двухзондовой системы на основе однозондовой ВАХ и вывод её аналитической зависимости. Излагается метод определения температуры и средней энергии, приходящейся на один электрон в плазме из полученной экспериментально двухзондовой ВАХ.

Плазменный кристалл. The plasma crystal. Thoma M. H., Kretschmer M., Rothermel H., Thomas H.M., Morfill G.E. *Amer. J. Phys.* **2005.** 73, № 5. 420–424. [РЖ 07.01-18A.142].

Комплексная плазма является многокомпонентной низкотемпературной плазмой, содержащей помимо ионов, электронов и атомов нейтрального газа, также микрочастицы, например пыль. При определенных условиях эти микрочастицы могут образовывать регулярную структуру – плазменный кристалл. Эта новая форма состояния вещества даёт уникальную возможность для изучения фазовых переходов и динамических аспектов систем многих тел на микроскопическом уровне. Комплексная плазма играет великую роль, как в астрофизике, так и в технологии. Описан эксперимент для студентов, в кото-

ром они могут создавать и исследовать плазменный кристалл и переход к жидкой фазе.

Экспериментальное изучение максвелловского распределения термоэлектронов в курсе общей физики. Козловский С. А. *МГОУ-XXI-Нов. технол.* 2007. № 1. 50–53. [РЖ 07.11-18А.117].

Предлагается вести подсчет термоэлектронов с помощью метода магнетрона: этот метод для определения удельного заряда электрона описан ранее и используется в других лабораторных практикумах. Магнетрон — это устройство, в котором электроны двигаются сразу в двух взаимно перпендикулярных полях: электрическом и магнитном. В рассматриваемом случае магнетрон представляет собой электронную лампу – диод, помещенный в магнитное поле соленоида. Диод располагается в соленоиде таким образом, что направление напряженности магнитного поля соленоида, направленное по оси соленоида, совпадает с осью симметрии диода.

Глава 9

ВАКУУМ

Получение и измерение высокого вакуума. А.П. Соколов. Физический практикум. 1937, 1938. Задача 21. С. 173.

Оборудование вакуумной установки включает в себя ртутный диффузионный (конденсационный) насос Ленгмюра, манометр Мак-Леода и U-образный манометр, форвакуумный ротационный насос, мензурку, пробирку с ртутью. В ходе выполнения работы изучается действие всех элементов установки, определяется постоянная манометра Мак-Леода, достигается высокий вакуум и измеряется объем вакуумной установки.

Измерение давлений. К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. Гостехиздат. 1946. С. 55-58.

Общеизвестными приборами для измерения статических давлений служат манометры с жидкостями, открытые и закрытые, а также манометры металлические, действие которых основано на явлении упругих деформаций твердых тел. Для измерения атмосферного давления применяются барометры разнообразных типов, которые можно разделить на барометры ртутные и барометры металлические, или anerоиды. Употребляются также поршневые манометры, основанные на принципе гидравлического пресса. Электрические манометры сопротивления основаны на изменении сопротивления металла при всестороннем сжатии. Очень низкие давления и малые разности давлений измеряются при помощи так называемых микроманометров, а те чрезвычайно незначительные давления газа, которые имеют место при различных вакуумных работах, измеряются при помощи очень разнообразных манометров, часто называемых вакуумметрами. Из этих приборов наиболее распространенными являются: микроманометры с жидкостью, манометр Мак-Леода, манометр с трением, манометр термоэлектрический и ионизационные манометры.

Микроманометры с жидкостью основаны на том же принципе, как и обыкновенные манометры, но их трубка L устанавливается не вертикально, а под небольшим углом к горизонту. Если при изменении давления показания вертикального манометра изменяются на L мм, то в случае наклонного манометра мениск жидкости перемещается в его трубке на большее расстояние. Обозначая его через l , очевидно, имеем:

$$l = \frac{L}{\sin \alpha}.$$

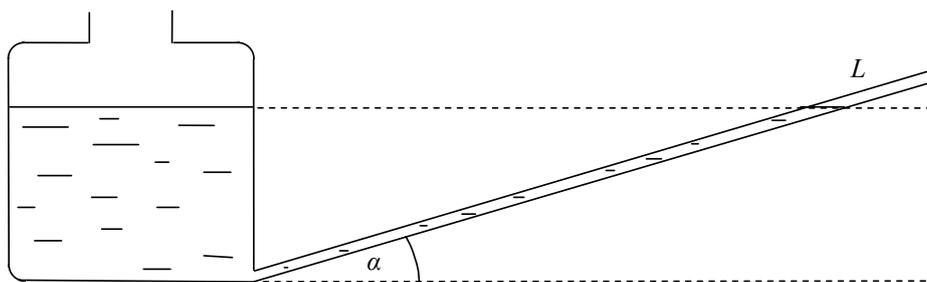


Рис. Микроманометр с жидкостью

При небольших углах α манометры этого типа, наполненные жидкостью с небольшим удельным весом (вода, спирт, ксилол), дают возможность измерять давления с точностью до 10^{-3} мм рт. ст.

Манометр (вакуумметр) Мак-Леода основан на законе Бойля–Мариотта.

Манометр с трением основан на затухании колебаний упругой (кварцевой) нити в атмосфере разреженного газа.

Ионизационный манометр основан на явлениях прохождения электрического тока через разреженные газы.

Получение высокого вакуума и его измерение при помощи манометра Мак-Леода. К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. Гостехиздат. 1946. Работа 10 а. С. 149-153.

Вакуумная установка состоит из двух баллонов для откачивания, ротационного форвакуумного насоса, который соединен с ртутным насосом Лэнгмюра, открытого ртутного манометра, манометра Мак-Леода и нескольких кранов, соединяющих между собой отдельные элементы установки. К вакуумной установке присоединена разрядная трубка, к полюсам которой подводится высокое напряжение от вторичной обмотки небольшой индукционной катушки, питаемой током аккумулятора. Это дает возможность непосредственно наблюдать зависимость между давлением газа в разрядной трубке и внешним видом разряда, чем часто пользуются на практике для качественного определения степени разрежения. При давлениях, близких к атмосферному, разряда в трубке не наблюдается, так как для образования искры между ее полюсами в обычных условиях необходимо очень высокое напряжение, для получения которого небольшая индукционная катушка недостаточна. При уменьшении давления в трубке, до нескольких сантиметров ртутного столба, в ней впервые начинает наблюдаться разряд, вначале в виде тонких слабых искр, которые в большом количестве образуются между электродами. При увеличении разрежения эти искры, сливаясь между собой, образуют ярко окрашенную непрерывную полосу, которая тянется почти на всем протяжении трубки. При дальнейшем увеличении разрежения, до давлений около 1 мм Hg, эта полоса расширяется, заполняя почти все сечение трубки, и обыкновенно распадается на отдельные части или *страты*, с темными промежутками между ними; это так называемый *слоистый разряд*. Наконец, при еще более высоких степенях разрежения, начиная от нескольких сотых долей миллиметра ртутного столба и выше, разряд сопровождается выделением *катодных лучей*, которые вызывают весьма характерное зеленоватое свечение, или *флуоресценцию*, на стенках разрядной трубки; яркость флуоресценции постепенно возрастает по мере увеличения степени разрежения. При достижении чрезвычайно высокого *предельного разрежения* разряд в трубке прекращается, так как газы в этих условиях теряют свою проводимость.

Измерение высокого вакуума термоэлектрическим манометром. К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. Гостехиздат. 1946. Работа 10 б. С. 153–155.

Постоянство теплопроводности газа при уменьшении давления сохраняется только до некоторого предела, пока разрежение в газе не достигает такой величины, при которой средняя длина свободного пробега молекул газа становится соизмеримой с размерами сосуда. При таких условиях теплопроводность газа уменьшается с

уменьшением давления. Выполнение лабораторной работы состоит в сравнении показаний термоэлектрического манометра, который не является абсолютным прибором, с показаниями манометра Мак-Леода. Одновременно наблюдается внешний вид разряда в разрядной трубке при различных давлениях.

Получение и измерение высокого вакуума. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. Молекулярная физика. Под ред проф. В.И. Ивероновой. **1951.** Задача 26. С. 142–151. 1953, 1955. Задача 26. С. 144–153.

В этой лабораторной работе студенты знакомятся с принципом действия ртутного, термоэлектрического и ионизационного манометров. Основное содержание работы – получение высокого вакуума (до 10^{-5} мм рт. ст.) и измерение объема вакуумной установки.

Отыскание течи вакуумной установки. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, **1959.** Работа 34. С. 110–111.

Градуирование манометра Мак-Леода. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск, **1959.** Работа 35. С. 112–113.

Знакомство с устройством масляного насоса. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М. А. Большаниной. Томск, **1959.** Работа 36. С. 114–115.

Измерение средней длины свободного пробега атомов металла в вакууме. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред проф. В.И. Ивероновой. **1962.** Задача 47. С. 230-235. **1967.** Задача 63. С.311–315.

Известно, что в высоком вакууме молекулярные пучки ведут себя подобно световому потоку – дают четкие тени от поставленных на их пути предметов при точечном источнике распыления и ясные тени и полутени при использовании источника конечных размеров. В данной лабораторной работе для создания молекулярного (атомного) пучка используется вакуумная установка, способная давать разрежение порядка 10^{-3} – 10^{-5} мм. рт. ст. На стеклянную пластинку распыляется металл (медь). Затем эта пластинка обрабатывается на микрофотометре – определяется оптическая плотность пятен на пластинке, соответствующих тому или иному давлению газа. По результатам измерений определяется средняя длина свободного пробега атомов меди.

Техника получения и измерения высокого вакуума. Физический практикум. Молекулярная физика. Под ред проф. В.И. Ивероновой.. **1962.** Задача 46. С. 221–230. Задача 62. **1967.** С.206–311.

Работа выполняется на вакуумной установке с ротационным насосом ВН-461М и паромасляным насосом ЦВЛ-100 или ММ-40А, термомпарным манометром ЛТ-2, ионизационным манометром ЛМ-2. К откачиваемой установке припаивается откачиваемый баллон с разрядной трубкой и трубкой, предназначенная для отыскания в ней мест натекания. В состав установки входят также электрическая

схема для измерения давления с помощью термодарного манометра, ионизационный вакуумметр типа ВИ-3, трансформатор Тесла. В ходе выполнения работы студенты знакомятся с устройством вакуумной установки, отдельных ее деталей, определяют предельное разрежение, достигаемое при помощи форвакуумного насоса, устанавливают связь между характером свечения газа и давлением.

Получение и измерение вакуума. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть II. МИФИ. Кафедра общей физики. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. 1962. Работа 12. С. 62.

Получение высокого вакуума и градуировка вакуумных манометров. Под ред. Л. Л. Гольдина. 1964. Работа 29. С. 168-178.

Универсальная вакуумная установка для студенческого практикума. Тагиров Р.Б., Хабибуллин М.В., Муравьев Б.В., Ярославцев Л.Т. “Изв. высш. учебн. заведений. Физика”, 1967, № 12, 120–121. [РЖФиз. 1968 7A87].

Описана схема установки, которая состоит из металлического каркаса размерами 450×610×1000 мм, форвакуумного насоса ВН-461М, стеклянного диффузионного насоса СДН-1, термодарной лампы, манометрической лампы, охлаждаемой ловушки, столика с плитой и колпаком, вакуумметра ВИТ-1АП и малогабаритного поворотного вакуумметра сжатия. Отдельные узлы установки связаны между собой при помощи кранов. Кроме того, имеются малые краны для впуска воздуха в насос после работы и для впуска воздуха в систему перед удалением деталей из-под колпака и для присоединения других откачиваемых объектов к вакуумной установке. Установку можно использовать для постановки практикума в помещении без разветвленной водопроводной сети. При помощи этой установки можно выполнить работы, описанные в пособии Р.Б. Тагирова “Введение в физику высокого вакуума и некоторые его применения (лабораторный практикум)”, 1967, Казанский университет.

Калоротор – простая тепловая машина, при помощи которой можно продемонстрировать движение отдельных молекул. Kenty Carl. The calorotor: a simple heat engine with which the motion of individual molecules may be demonstrated. “*Amer. J. Phys.*”, 1967, 35, № 12, 1120–1124. [РЖФиз. 1967 10A58].

Радиометр Крукса и манометр Кнудсена представляют собой приборы, основанные на радиометрическом действии. Этим термином обычно обозначают действие силы на лопасти ротора, возникающее при неодинаковом подогреве лопаток. В радиометре Крукса неодинаковый подогрев достигается путем зачернения лопаток с одной стороны. Максимальное действие радиометра достигается при давлении ≈ 1 мм рт. ст., когда средний свободный пробег молекул много меньше размеров сосуда. В статье рассматривается другой случай радиометрического действия, имеющий место в манометре Кнудсена. В этом случае давление газа настолько мало, что средний свободный пробег молекул больше диаметра сосуда. Полоска нагревателя расположена с одной стороны подвижной лопатки на небольшом расстоянии от нее. Отдельные молекулы увеличивают свою скорость, ударяясь в поверхность нагревателя. Ударяясь затем о лопатку и отталкиваясь от нее, они сообщают ей большее количество движения, чем более медленные молекулы, ударяющиеся с другой стороны. Обычно в манометре

Кнудсена лопатка или несколько лопаток висят на тонком подвесе и давление измеряется по закручиванию подвеса. В статье описаны эксперименты с простым прибором, в котором непрерывное вращение лопаток достигается за счет столкновений с отдельными молекулами, так что можно считать, что прибор действует как радиометр. Описана конструкция прибора, рассмотрена элементарная теория его действия и описаны применения прибора в качестве манометра подобно манометру Кнудсена, в качестве гигрометра и в качестве индикатора изменений температуры.

Проект простого вакуумметра. Janes J., Sikwese F.H. A simple vacuum grange project. *“Physical Education”*, 1973. 8, № 5, 326-328. [РЖ 1973 12А101].

Описаны две работы студенческого практикума по созданию вакуумных манометров с помощью минимальных средств. 1. Вакуумметр представляет собой баллон на металлическом основании, в котором вмонтированы: медная спираль (коллектор электронов), основной проводник из меди (коллектор ионов) и вольфрамовая нить накала, подключенная к источнику переменного напряжения в 90 В. К ионному коллектору приложено постоянное напряжение -20 В, к электронному 150–200 В. Фиксируя электронный ток и измеряя ионный ток при постепенном изменении давления, можно осуществить калибровку вакуумметра.

2. Второй прибор представляет собой простой вариант вакуумметра Пирани, основанный на измерении сопротивления проводника вследствие уменьшения его тепловых потерь с падением концентрации ионов при понижении давления. Константановый проводник помещался в баллон и включался в одно из плеч моста Уитстона, сбалансированного при атмосферном давлении. С падением давления в баллоне увеличивается сопротивление проводника и растет ток разбаланса.

Получение и измерение вакуума. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. 1983. Работа 3.10. С. 222-233.

Изучение процесса электрооткачки. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. 1983. Работа 3.11. С. 233-239.

Осмоз. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. МФТИ. 1983. Лаб. работа 3.14. С. 251-255.

Осмоз – это прохождение растворителя через полупроницаемую перегородку. Пусть в сосуде, разделенном на две части полупроницаемой перегородкой, по одну сторону которой находится вода, а по другую – водный раствор вещества, молекулы которого не могут проходить сквозь перегородку. Пусть обе части сосуда наполнены до одинакового уровня. Вода начинает переходить в ту часть сосуда, где содержится раствор. Этот переход продолжается до тех пор, пока между водой и раствором не установится некоторая разность уровней, а, следовательно, и разность давлений; она носит название осмотического давления раствора. Осмотическое давление подчиняется формуле, аналогичной формуле для давления идеального газа: $P_{осм.} = nkT$, где n – число молекул растворенного вещества в единице объема. В работе измеряется $P_{осм.}$ для растворов разной концентрации и строится график зависимости $P_{осм.}(n)$.

Получение и измерение вакуума. П.С. Булкин. Под ред А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988, 1999. Лаб. работа 6.1. С. 156-161.

Оборудование лабораторной работы состоит из вакуумной установки с форвакуумным насосом, системы стеклянных трубопроводов с кранами и манометром ЛТ-2, высоковакуумного агрегата с диффузионным насосом и ионизационным манометром, вакуумметра ВИТ-3, разборного макета форвакуумного насоса. Измеряются предельный вакуум, зависимость скорости откачки форвакуумным и диффузионным насосами от давления.

Получение и измерение тонких пленок. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988, 1999. Лаб. работа 6.2. С. 161–170.

Оборудование лабораторной работы состоит из вакуумной установки с приспособлением для термического распыления металлов, микрофотометра МФ-2, устройства с цифровым омметром для измерения электрического сопротивления, набора стеклянных пластинок в качестве подложек с закрепленными на них электродами. Напыление пленок металла на стеклянные подложки производится методом термического распыления в вакууме. Поток распыляемого металла от точечного источника вырезается диафрагмой и направляется на поверхность стеклянной пластинки, где осаждается. Толщина напыленной пленки зависит от температуры и времени напыления и от расстояния между испарителем и подложкой. Оптические и электрические свойства тонких пленок в значительной степени зависят от их толщины, которая определяется по поглощению проходящего сквозь пленку света. В настоящей работе определяется также электрическое сопротивление пленки, а также средняя длина свободного пробега атомов металла.

Расширение возможностей учебных экспериментов с системами высокого вакуума в курсе общей физики. Expanding the experiments performed with undergraduate comprehensive high-vacuum systems. Dos-Santas J. m. F. *Eur. J. Phys.*-1990.-11. № 2. С. 130–131. [РЖ 1990 11A161]

Системы высокого и низкого вакуума, распространенные в научных лабораториях и в промышленности, не позволяют, как правило, непрерывно проследить изменение давления в откачиваемой камере, что затрудняет постановку наглядного учебного эксперимента. Показано, как использование прибора Тиранитеннинга позволяет создать вакуумную установку с непрерывным контролем давления от атмосферного до 10^{-5} Па. Кратко обсуждаются некоторые учебные эксперименты по вакуумной технике, которые могут быть реализованы на предлагаемой установке: построение зависимости давления от времени при включенном и выключенном насосе, определение скорости откачки и т.п.

Недорогой напускатель газа для лабораторий. An inexpensive gas effusion apparatus for the introductory laboratory. Amato J.C., Williams R.E. *Amer. J. Phys.* 1991. 59, № 4. С. 346–349. [РЖФиз. 1992-9A92].

В рамках решения задачи обеспечения оборудованием лабораторий по вводному курсу “Современная физика” и, в частности, раздела, посвященного доказательству атомной теории строения вещества, создано устройство для инъекции газа при проведении учащимися измерений скорости молекул. Устройство основано на принципе действия крионасоса, откачка которым производится за счет адсорбции молекул на охлаждаемую жидким азотом ловушку. Стоимость такого устройства гораздо ниже, чем диффузионных и роторных вакуумных насосов. Средняя скорость молекул v , выпускаемых в предварительно откачанный объем, определяется по зависимости давления P от времени напуска t . Аппроксимация зависимости $\ln P(t)$ дает значения v , отличающиеся от расчетных не более чем на 10%.

Способ измерения длины свободного пробега молекул для учебных лабораторий. Булкин П.С., Васильева О.Н., Малова Т.И. *Учеб. эксперим. в высшей школе.* 2000. № 1. 36-40. [РЖ 00.12-18А126].

Измерение длины свободного пробега молекул проводится как при обычных давлениях вблизи 1 атм., так и при низких, в вакууме. Однако измерение длины свободного пробега в зависимости от давления в достаточно широком диапазоне, например, при изменении давления на порядок, требует преодоления ряда экспериментальных трудностей. Описан способ измерения длины свободного пробега молекул воздуха при давлениях ниже 1 Тор. Обсуждается выбор диапазона давлений для проведения измерений. Описана установка для изучения в учебных лабораториях зависимости длины свободного пробега молекул от давления.

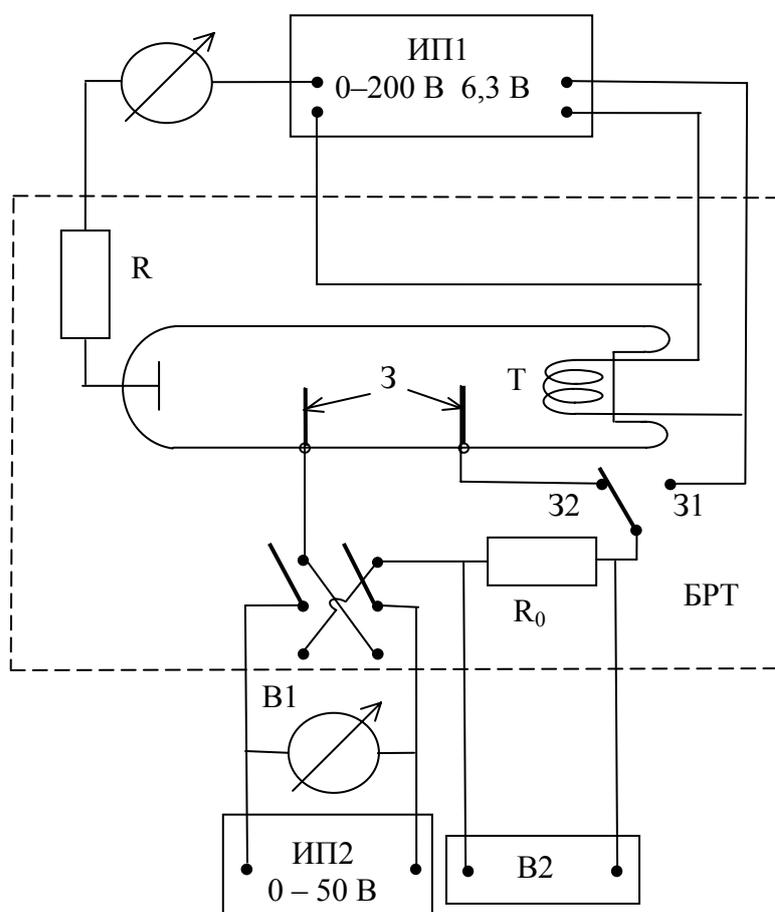
Измерение проницаемости в учебных вакуумных лабораториях: простой эксперимент с использованием детектора утечек геля. Permeability measurements in undergraduate vacuum laboratories: A simple experiment using a He leak detector. Dos Santos J. M.F., Veloso J.F.C.A., Monteiro C.M.B. *Eur. J. Phys.* 2004. 25, № 1. L1-L3. [05.06-18А.137].

Глава 10

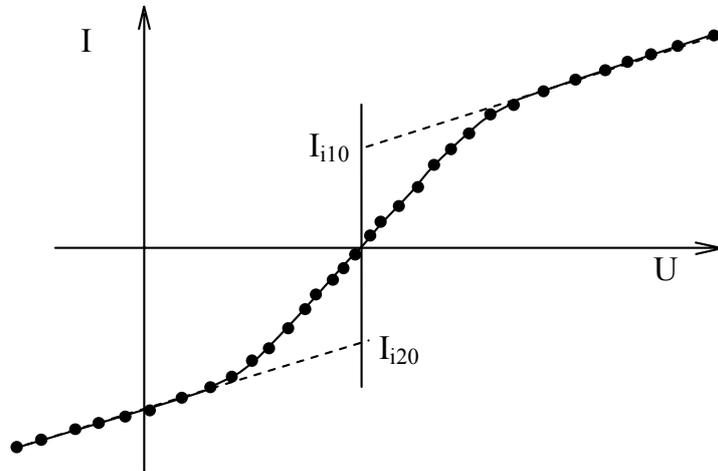
ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД

Измерение температуры электронов в плазме. П.С. Булкин, И.И. Попова. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Изд. моск. ун-та. 1988, 1999. Лаб. работа 7.6. С. 200–206.

Целью работы является изучение свойств газового разряда в гелии зондовым методом, разделение ионного и электронного токов зонда и измерение температуры электронов. Схема экспериментальной установки состоит из блока газоразрядной трубки (БРТ), источника питания трубки (ИП1) с вольтметром, источника питания зондовой цепи (ИП2) с выносным вольтметром (В1) и цифрового вольтметра (В2). В блоке газоразрядной трубки находятся: трубка Т с зондами З, анодное сопротивление $R = 1 \text{ кОм}$ для ограничения анодного тока, милливольтметр для измерения тока разряда, калиброванное сопротивление $R_0 = 100 \text{ Ом}$, переключатель полярности напряжения на зонды и тумблер изменения режима работы с одним зондом 31 или с двумя 32. Газоразрядная трубка заполнена гелием при давлении $1,5 \text{ Торр}$. Ток в цепи зонда измеряется по падению напряжения на сопротивлении R_0 , величина которого значительно меньше сопротивления участка плазмы, входящего в цепь зонда, поэтому напряжение на сопротивлении R_0 пропорционально току через зонд. Это напряжение измеряется цифровым вольтметром В2.



На следующем рисунке представлена зависимость полного тока на зонд $I=I_e+I_i$, складывающегося из тока ионов и тока электронов, от величины потенциала зонда относительно плазмы U . Ось положительных токов направлена вниз. По этому графику находится производная dU/dT вблизи точки $I = 0$, определяется средняя энергия электронов и их температура T .



Температура электронов определяется по однозондовой и по двухзондовой вольтамперным характеристикам

Тиратрон как генератор низкотемпературной плазмы. П.С. Булкин, Г.А. Миронова, Т.И. Малова. *Физ. образ. в вузах*. 2005. Т. 11. № 3. С. 64–67.

Знакомство студентов с плазмой в курсе общей физики, как правило, связано с изучением статистических законов, а также газокINETических и газодинамических процессов в плазме. Одним из наиболее распространенных методов исследования свойств плазмы является метод зондов, предложенный Ленгмюром. В общем физическом практикуме физически наглядно дается интерпретация вольтамперных характеристик (ВАХ) лишь в случае одного зонда. На практике же применяются как однозондовый, так и двухзондовый методы. Причем двухзондовый метод более предпочтителен, так как в нем используются небольшие зондовые токи и нет опасности перегрева зондов, их распыления. В данной работе приводится: 1) методика графического построения ВАХ и вывод ее аналитической зависимости; 2) метод определения температуры и средней энергии, приходящейся на один электрон в плазме из полученной экспериментально двухзондовой ВАХ.

Глава 11

ВОЛНЫ

Определение скорости звука методом стоячей волны в раздвижной трубе. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В.И. Ивероновой. 1967. Задача 42. С.209–212.

Определение C_p/C_v по скорости звука в газе. Под ред. Л.Л. Гольдина. 1964. Работа 26. С. 155–158. 1973. Работа 25. С. 166-170. 1983. Работа 3.7. С. 208–212.

Показатель адиабаты $\gamma = C_p/C_v$ связан со скоростью звука v в газе соотношением

$$\gamma = \frac{\mu}{RT} v^2 ,$$

где μ – молекулярный вес газа, R – универсальная газовая постоянная, T – температура газа. Основным элементом экспериментальной установки является труба, в которой находится исследуемый газ. К торцам трубы через тонкие резиновые трубки присоединены телефон и микрофон. Телефон, подключенный

к генератору напряжения звуковой частоты, возбуждает в трубе звуковые колебания воздуха, а микрофон, улавливая их, преобразует их в электрическое напряжение, которое подается на осциллограф. При неизменной частоте звукового генератора (а следовательно, и длине звуковой волны) можно изменять длину трубы. Для этого в работе применяется раздвижная труба. При постоянной длине трубы можно изменять частоту звуковых колебаний. В каждом варианте работы на экране осциллографа наблюдается картина, соответствующая установлению в трубе стоячих звуковых волн. Изменяя длину трубы или частоту генератора, можно наблюдать последовательность резонансов. Графическое представление результатов измерений (зависимость удлинения трубы или резонансной частоты от номера резонанса) позволяет определить длину полуволны, что в свою очередь позволяет вычислить и скорость звука.

Измерение скорости распространения и коэффициента затухания ультразвука импульсным методом. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Изд. 2-е. “Наука”. 1973. Работа 28. С. 178–188.

Измерение скорости ультразвука в жидкости с помощью ультразвукового интерферометра. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Авторы: Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Изд. 2-е. “Наука”. 1973. Работа 29. С. 188–196.

Измерение скорости ультразвуковой волны в воздухе. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988. Лаб. работа 3.1. С. 67–70.

Целью работы является определение некоторых термодинамических характеристик воздуха – отношения теплоемкостей c_p/c_v , адиабатической сжимаемости, коэффициента теплового расширения воздуха – из экспериментальных измерений скорости ультразвуковых волн в воздухе и ее температурной зависимости. Оборудование экспериментальной установки состоит из ультразвукового дефектоскопа с излучателем и приемником в виде отдельных акустических головок, укрепленных в специальных держателях с перемещением, тубы с подогревом, термометра и термопары. Методика измерений состоит в определении времени прохождения ультразвуковым импульсом определенного пути в воздухе от излучающей головки до приемной.

Определение скорости ультразвуковых волн методом звукового фазометра. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988. Лаб. работа 3.2. С. 70–73.

Измеряется скорость ультразвуковой волны в воздухе по изменению фазы волны, прошедшей определенный путь в среде, и вычисляются отношение теплоемкостей c_p/c_v и адиабатическая сжимаемость.

Определение скорости звука в жидкости и расчет некоторых термодинамических параметров. П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988. Лаб. работа 3.3. С. 74–77.

Определяется скорость распространения ультразвуковой волны в дистиллированной воде при температуре от 10 до 40° С.

Изучение упругих свойств твердого тела ультразвуковым методом.

П.С. Булкин. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М. 1988. Лаб. работа 3.4. С. 77–80.

Изучается процесс распространения ультразвуковой волны в твердом теле – стержнях из алюминия и латуни – измеряются скорости распространения продольных и поперечных (сдвиговых) волн, определяются модули Юнга и модули сдвига, рассчитывается характеристическая температура Дебая.

Измерение скорости ультразвуковой волны в воздухе. П.С. Булкин, И.И. Попова. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Изд. моск. ун-та. 1999. Лаб. работа 3.1. С. 66–70.

Экспериментальная установка базируется на ультразвуковом дефектоскопе с излучателем и приемником в виде отдельных акустических головок, укрепленных в специальных держателях с перемещением, трубы с подогревом, термометра или термопары. По результатам измерений времени распространения импульса между головками определяются отношение теплоемко-

стей, адиабатическая сжимаемость, коэффициент теплового расширения воздуха, а также зависимость скорости звука в воздухе от температуры.

Определение скорости ультразвуковых волн методом звукового фазометра. П.С. Булкин, И.И. Попова. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Изд. моск. ун-та. **1999**. Лаб. работа 3.2. С. 70–73.

Измеряется скорость распространения звуковой волны посредством изменения расстояния между звуковыми головками, а также посредством изменения частоты генератора.

Определение скорости звука в жидкости и расчет некоторых термодинамических параметров. П.С. Булкин, И.И. Попова. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Изд. моск. ун-та. **1999**. Лаб. работа 3.3. С. 74–77.

Оборудование лабораторной работы состоит из вертикального акустического волновода с исследуемой жидкостью, ультразвукового дефектоскопа с двумя акустическими головками и термостата с контактным термометром. Определяется скорость распространения ультразвуковой волны в дистиллированной воде при температуре от 10°C до 40°C .

Глава 12

РАЗНОЕ

Конструирование барометра с двумя жидкостями в качестве лабораторной работы учащихся. Вильямсон. Two-fluid barometer as a student project. Williamson Charles. Amer. J. Phys. 1955. 23. № 8. 492–494. [РЖФиз. 1956 10-27747].

Отмечаются достоинства изобретенного Деартом барометра с двумя жидкостями, соединяющего в себе чувствительность водяного барометра, с компактностью, мало отличающейся от компактности ртутного барометра. Описаны два типа барометров – с прямой и изогнутой трубкой (чашечный и сифонный). В качестве жидкостей рекомендуется ртуть и бутилфталат. Даны указания к конструированию барометра.

Физика “пьющей утки”. Миллер Д.С. Physics of the dunking dick. Miller Julius Sumner. Amer. J. Phys. 1958. 26. № 1. С. 42–43. [РЖФиз. 1958 № 12 26640].

Поясняется устройство известной игрушки, представляющей собой утку, наклоняющуюся к сосуду с водой через некоторые промежутки времени и повторяющую это движение неопределенно долго без участия какого-либо видимого движущего механизма.

Измерение атмосферного давления. Барометр Краевича. Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. 1959. Работа 2. С. 10–12.

$$v_t = \frac{2lv_n}{n} = \frac{2lv_{n+1}}{n+1}, \text{ при этом } v_n(n+1) = v_{n+1}n, \quad n = \frac{v_n}{v_{n+1} - v_n}.$$

Отношение удельных теплоемкостей находится из соотношения

$$v = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}},$$

где $\gamma = c_p/c_v$, p – давление воздуха, ρ – плотность воздуха.

Измерение атмосферного давления. С.С. Прилежаев. Физический практикум. Часть I. Механика и молекулярная физика. Методич. пособие для студентов сан. ф-та мед. ин-та. Ленинград. 1962. С. 70–83.

Определение удельной поверхности пористых тел по изотерме адсорбции. Физический практикум. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. 1962. Работа 16. С. 87.

Определение атомного веса меди методом электролиза. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. 1962. Работа 10. С. 53.

Атомный вес определяется путем сравнения количеств двух веществ, выделяющихся в двух включенных последовательно электролитических ваннах, через которые пропускается один и тот же ток. В данной работе в одной ванне выделяется медь из раствора CuSO_4 в воде, во второй – водород из раствора H_2SO_4 . Масса выделившейся меди определяется путем взвешивания соответствующего электрода до и после электролиза. Масса водорода определяется по давлению и объему выделившегося газа.

Несколько неклассических экспериментов. Simons M., Engelen M. Quelques experiences non classiques. "Documentation. 24". Bruxelles, s. a., 35–41. [РЖФиз. 1964 10A91].

Описаны следующие опыты 1) определение порядка размеров молекул, атомов и числа Авогадро. Капля раствора олеиновой кислоты с заданной концентрацией выливается из градуированной бюретки на поверхность воды. Измеряется площадь масляного пятна и находится его толщина $h = V/S$. Исходя из того, что каплю образует мономолекулярный слой, причем цепочка атомов поляризована в направлении, перпендикулярном поверхности воды, можно оценить порядок размеров атомов, составляющих молекулу олеиновой кислоты. Если предположить, что молекула представляет собой параллелепипед с базой $h/4$, то объем ее $V_1 \approx h^3/16$ и концентрация молекул в капле $n = V/V_1$. Если масса моля равна M , масса капли m , то число Авогадро $N = nM/m$. 2) Определение числа Авогадро, константы Фарадея и заряда электрона. Производится электролиз раствора H_2SO_4 . По закону Фарадея масса водорода, выделившегося на катоде, $m = (It/F) \cdot (m_a/n)$ (m_a – атомный вес, n – валентность). С другой стороны, величину m можно определить по уравнению состояния идеального газа, измерив объем, давление и температуру водорода, собранного в измерительный сосуд. Отсюда число Фарадея $F = (It/m) \cdot (m_a/n)$ и заряд иона водорода $e = F/N$. 3) Интерференция света. 4) Фотоэлектрический эффект с помощью неоновой лампы. 5) Измерение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли с помощью соленоида. 6) Определение постоянной Планка по спектру атома водорода.

Исследование стационарного потока жидкости в трубе. Под ред. Л.Л. Гольдина., 1964. Работа 21. С. 133–136. 1973. Работа 19. С. 137–140.

Исследуется движение воды по горизонтальной трубке. Вода поступает в трубку из нижней части цилиндрического резервуара. Трубка снабжена последовательно расположенными расходомерами Вентури и Пито. Первый из них представляет собой трубку с плавно меняющимся сечением. В узком (сечение S_1) и широком (сечение S_2) участках трубки сделаны выводы к U-образному ртутному манометру, измеряющему разность давлений $p_2 - p_1$ в соответствующих сечениях. В результате скорость потока во втором сечении трубки может быть вычислена по формуле

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho \left(\frac{S_2^2}{S_1^2} - 1 \right)}}$$

где ρ – плотность жидкости. Расходомер Пито позволяет рассчитать скорость жидкости по разности ее высот ($p_1' - p_2'$) в его манометрических трубках:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_1' - p_2')}{\rho}}.$$

Расходомеры Вентури и Пито позволяют исследовать применимость уравнения Бернулли к движению жидкости в трубке. Скорость воды в трубке трудно измерить непосредственно, например, по времени, в течение которого струя заполняет резервуар, размещенный за трубкой. Сопоставление измеренного и рассчитанных значений скорости может служить для проверки применимости уравнения Бернулли. На основании полученных в эксперименте данных строится график зависимости $v^2 = f(H)$, где H – высота уровня жидкости в цилиндрическом резервуаре. Для всех исследованных режимов вычисляется также число Рейнольдса, по величине которого определяется характер течения жидкости (турбулентный или ламинарный).

Закон Дарси. Horton George W. Darcy's law. "Amer. J. Phys.", 1964, 32, № 7, 569. [РЖФиз. 1964 12А69].

Закон Дарси для течения жидкости через пористую среду ($q = -KA\Delta\phi/\Delta L$), где q – скорость потока, A – сечение потока, K – постоянная, $\Delta\phi/\Delta L$ – уклон) аналогичен закону Ома. Эта аналогия может быть продемонстрирована на опыте. Вода из вертикального цилиндрического сосуда вытекает у дна через длинную горизонтальную трубку, заполненную дробью. Вертикальный сосуд отвечает некоторой емкости системы C , а горизонтальная трубка – сопротивлению R . Высота столба жидкости в вертикальном сосуде h изменяется по закону $h = h_0 \exp(-t/RC)$, который соответствует разряду емкости через сопротивление.

Определение удельной поверхности пористых тел по изотерме адсорбции. Физический практикум. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. Москва, 1965. Работа 16. С. 87–94.

Эксперименты по молекулярной физике с использованием акустического интерферометра. Rassing Thomas D. Experiments in molecular physics with an acoustic interferometer. "Amer. J. Phys.", 1973, 41, № 3, 351–354. [РЖ 1973 8А69].

Для физического практикума изготовлен ультраакустический интерферометр типа Пирса. Точность измерения скорости ультразвука не хуже 0,1%. С его помощью измеряется время колебательной релаксации молекул газа из положения точки перегиба кривой зависимости квадрата скорости ультразвука от отношения частоты к давлению. Для фреона-22 получено, что время колебательной релаксации составляет 10^3 времени между последовательными столкновениями молекул. Полученное с помощью интерферометра линейное убывание квадрата скорости ультразвука при увеличении давления иллюстрирует преобладание эффекта межмолекулярного взаимодействия над эффектом конечности размеров молекул реального газа. С помощью интерферометра можно также наблюдать вращательную дисперсию, уменьшение времени возбуждения молекул кислоро-

да при добавке к последней паров воды, а также температурную зависимость времени релаксации.

Упрощенная калориметрическая задача для студенческого практикума. Bartle K. D., Osborn P. M. A simplified undergraduate calorimetry experiment. "J. Chem. Educ.", 1973, 50, № 9, 637. [РЖ 1974 3А90].

Для определения энтальпии реакции $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ (нейтрализация NaOH концентрированной HCl) сконструирован стеклянный калориметр с малым тепловым эквивалентом 70 Дж/град. Сопротивление его спирали нагрева 3 Ом, питание 8 В постоянного типа. Регистрируется изменение температуры за счет реакции нейтрализации, а затем определяется количество теплоты, получаемое от спирали нагрева, которое вызывает такое же изменение температуры. Поскольку удельная теплоемкость 0,25 М NaCl и HCl одинаковы, то необходимо учитывать только температурный эффект разбавления. В пределах ± 2 кДж/моль задача дает литературное значение энтальпии – 56,8 кДж/моль.

Применение электронных устройств в лабораторных работах по молекулярной физике. Dyson J. E. Applications of electronic devices in the sixth form laboratory. "Phys. Educ.", 1974, 9, № 5, 305-307. [РЖ 1975 1А86].

Описаны две лабораторных работы по молекулярной физике с применением электронного оборудования, разработанного автором. Для определения показателя адиабаты воздуха (γ) используется генератор импульсов. Генератор импульсов питает соленоид, охватывающий стеклянную трубку с поршнем, к которому прикреплен стержневой магнит. Показано, что квадрат частоты колебаний поршня линейно зависит от показателя γ для воздуха, находящегося между поршнем и дном стеклянной трубки. По частоте следования импульсов при резонансе колебаний поршня графически определяется показатель γ . Во второй лабораторной работе для наблюдения распределения радиальной компоненты скоростей электронов, вылетающих из накаливаемой нити, используется магнетрон с отключенным анодным питанием, помещенный в магнитное поле, пилообразно меняющееся со временем. На экране осциллографа, на Y пластины которого подается с помощью RC-цепочки производная по времени от тока через магнетрон, наблюдается кривая распределения радиальной компоненты скоростей.

Несколько заметок о лабораторных работах. Premysl Nekolih nametu pro laboratorni prace. "Mat. a fyz. sk.", 1975, 5, № 8, 620–627. [РЖ 1975 12А172].

Предложено усовершенствование методики выполнения трех лабораторных работ. Для проверки закона Бойля-Мариотта вместо трубки Мельде предлагается взять U-образную трубку с ртутью, один конец которой запаян, а второй – открыт. Нижняя часть трубки с помощью резиновой трубки соединяется с резервуаром с ртутью. Даны советы по измерению коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца и теплоты испарения воды с помощью электрического нагревателя.

Лабораторный эксперимент по гидродинамике. Curzon F.L., Neilson B., Tsunamis, sealing wax, and string. "Amer. J. Phys." 1976, 44, № 11, 1073-1076. [РЖ 1977 5А94].

Описана методика проведения эксперимента по гидродинамике, позволяющего регистрировать профиль фронта волны с большой амплитудой (волна цунами). Экспериментальная установка представляет собой деревянный резервуар 300x15x15 см, наполненный водой, в одной из боковых стенок которого имеется застекленное окно для наблюдения за распространением гребня волны. Волна создается с помощью деревянного поршня,двигающегося в резервуаре с водой под действием груза, соединенного с поршнем нитью и перекинутого через блок. Резервуар установлен на лабораторном столе и может принимать наклонное положение относительно плоскости стола. Приведены теория эксперимента и экспериментальные результаты. Подробно описана процедура обработки экспериментальных данных.

Исследование растворов методом молекулярного рассеяния света – отыскание аппроксимирующих полиномов методом наименьших квадратов. О.Б. Васильев, М.Ф. Вукс, Р. Григорьев и др. Физический практикум с применением ЭВМ. Выпуск 2. Ленинград. 1977. Работа № 3. С 57–63.

Определение газовых постоянных с помощью электролиза. Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. (Учебное пособие). Одесса. 1977. Задача 13. С. 56–59.

Установка для экспериментальной проверки закона Бернулли. Benenson R.E., Nagle E.R. Bernoullis principle apparatus. “*Phys. Teach.*” 1977. 15, № 2. 117–118. [РЖ 1978 3А97].

Установка, использование которой позволяет продемонстрировать справедливость закона Бернулли для несжимаемой жидкости, представляет собой вертикально установленную стеклянную трубку диаметром 50 мм с входным горизонтальным отростком и вертикальным отростком для измерения давления диаметром 4 мм и длиной 1,2 м. С помощью латунного фланца с канавкой монтировалось съемное дно трубки в виде латунного диска толщиной 1,6 мм, в котором заранее просверливалось отверстие диаметром 0,003 мм. Разность высот, на которых находились узкое сечение выходного канала и широкое сечение трубки, в котором измерялось давление, составляла 154 см. Разность давлений в широком и узком сечениях измерялась высотой столба жидкости в вертикальном отростке, а разность соответствующих скоростей течения жидкости определялась на основе уравнения непрерывности. Путем выбора малой длины узкого канала существенно уменьшалось влияние вязкости жидкости, что позволяло продемонстрировать равенство правой и левой частей уравнения Бернулли с точностью до нескольких процентов.

Измерение парциального давления водяного пара. Smith Mark K. Measuring the partial pressure of water vapor. “*Phys. Teach.*” 1978. 16, № 9. 654. [РЖ 1979 6А111].

Представлен метод измерения парциального давления водяного пара. Экспериментальное оборудование состоит из большой колбы с ответвляющимися трубками, которая соединяется с вакуумным насосом и эксикатором. Содержимое колбы может изолироваться от атмосферы специальной пробкой из самогерметизирующегося материала. В начале эксперимента колба изолируется за-

жимом от эксикатора и откачивается с помощью вакуумного насоса. Затем откачанная колба заполняется сухим воздухом из эксикатора; давление в колбе должно быть равно атмосферному. Целесообразно откачку колбы с последующим подсоединением ее к эксикатору повторить несколько раз, чтобы быть уверенным, что воздух в колбе совершенно сухой. Затем колба отсоединяется от эксикатора и присоединяется к манометру. С помощью медицинского шприца сквозь самогерметизирующуюся пробку в колбу вводится некоторое количество дистиллированной воды. Давление водяных паров замеряется в тот момент, когда водяной пар начинает конденсироваться на стенках сосуда, что свидетельствует о максимуме давления водяных паров в сосуде. При измерениях следует удостовериться, что в системе нет утечки. Предложенный метод измерений может применяться и при измерениях парциальных давлений других жидкостей.

Простая лабораторная установка для измерения отношения C_p/C_v резонансным методом. Simple C_p/C_v resonance apparatus suitable for the physics teaching laboratory. Smith D.G. "Amer.J.Phys." **1979**, 47, № 7. 593-596. [РЖ 1980 2A98].

Установка предназначена для использования в физической программе университетов. Установка состоит из стеклянного цилиндра, внутри которого свободно перемещающийся легкий поршень, изготовленный из алюминиевого сплава. В поршень впрессован постоянный магнит, имеющий форму стержня, расположенного вдоль оси цилиндра. Вся система помещается в соленоид, опоясывающий укрепленный в вертикальном положении цилиндр. На соленоид подается напряжение, имеющее как постоянную, так и переменную составляющую. Вследствие этого поршень удерживается в средней части цилиндра и совершает небольшие колебания с частотой переменного напряжения. Показано, что зависимость амплитуды вынужденных колебаний поршня от частоты напряжения имеет максимум, положение которого зависит от отношения теплоемкостей C_p/C_v , давления газа, параметров установки и граничных условий на торцах цилиндра. Относительная погрешность измерения C_p/C_v данным методом составляет около 1.5%. Приводятся экспериментальные результаты для различных газов.

Лабораторные эксперименты по определению средней массы молекул воздуха с помощью чувствительного газового манометра. Hayn Carl H., Galvin Vincent, Jr. Experimental determination of the mass of air molecules from the law of atmospheres. "Amer. J. Phys". **1979**, 47, № 1. 69-70. [РЖ 1979 10A121].

Описана методика проведения эксперимента по определению средней массы молекул воздуха. Основу эксперимента составляют измерения атмосферного давления на разной высоте относительно уровня моря. Полученные значения давлений подставляются в барометрическую формулу и с помощью ЭВМ вычисляют среднюю массу воздуха. Для проверки результатов проводят сравнение экспериментально полученных данных с величиной, вычисленной на основании известных молекулярных весов и процентного содержания газов, являющихся основными компонентами воздуха. Описывается устройство сконструированного для данного эксперимента газового манометра, имеющего чувствительность 0,002 мбар, что позволяет проводить измерение разностей атмосферного давления на разных высотах внутри учебного корпуса.

Исследование гальванического элемента. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. **1983**. Работа 3.12. С. 239–244.

Влияние растворенного воздуха на плотность воды. The influence of dissolved air on the density of water. Girard Georges, Coarasa Marie-Josette. “*US Dep. Commer. Nat. Bur. Stand. Spec. Publ.*” 1984. № 617: *Precis Means. and Fund. Constants II. Proc. 2nd Int. Conf. Gaithersburg, Md. June 8–12, 1981*, 453–456. [РЖ 1985 6A162].

Проведены измерения зависимости плотности воды ρ от содержания растворенного в ней воздуха в диапазоне температур 4–22° С при степени насыщения 0.1–0.95. Описана гидростатическая установка для определения ρ . Перед измерениями вода подвергается двойной дистилляции и выдерживается в течение 3 ч при температуре 68° С и давлении 28 мПа для удаления остатков воздуха. Впоследствии при измерениях в течение нескольких дней концентрация воздуха в воде медленно возрастает вследствие естественного процесса растворения. Приведены экспериментальные зависимости ρ от степени насыщения воздухом при температурах 4 и 22°С. Получена также линейная температурная зависимость величин ρ для воды, полностью свободной от следов растворенного в ней воздуха и воды, предельно насыщенной воздухом.

Демонстрационный PVT-прибор. Demonstracny PVT pristroj. Chalupkova Aurella, Bukoven Pavol, Lehotsky Dobroslav. “*Mar. a fyz.sk.*”. **1984/1985** 15, № 4. С. 269-278.[РЖ 1985 №5 A120].

Описан прибор, позволяющий качественно и количественно изучать связь между давлением, объемом и температурой газа, с необходимой точностью проверять законы Бойля–Мариотта, Гей-Люссака, Шарля и уравнение газового состояния для идеального газа. Прибор состоит из стеклянного сосуда с газом (воздухом), погруженного в ванну с водой, термостата, демонстрационного термометра и жидкостного манометра. Дается характеристика каждой части установки, приведена электрическая схема подключения термостата к прибору. Рассмотрена методика показа изохорического, изобарического и изотермического процессов, а также проверки уравнения газового состояния.

Обратимость и шаговые процессы. Эксперимент для лаборатории старшекурсников. Reversibility and step processes. An experiment for the undergraduate laboratory. Gupta V.K., Shanker Gauri, Sharma N.K. “*Amer. J. Phys.*”, **1984**. 52, №10. С. 945–947.[РЖ 1985 5A122].

В описываемом эксперименте пружина сжимается от начального (ненапряженного) состояния до конечного ступенчатым образом, т. е. за конечное число дискретных шагов. Показано, что повышение энтропии в результате такого процесса обратно пропорционально числу шагов. Т. о., подтверждается интуитивное представление о том, что при переходе к идеальному (непрерывному) процессу с бесконечным числом бесконечно малых шагов изменение энтропии стремится к нулю, т.е. процесс становится обратимым. Эксперимент состоит в том, что вертикально подвешенная пружина нагружается последовательным добавлением одинаковых грузиков до некоторой конечной массы. При добавлении каждого грузика возникают колебания, энергия которых, в конечном счете, рассеивается в тепло. Энергия этих колебаний измеряется фотоэлектрическим методом, основанным на измерении скорости груза в момент прохождения через

положение равновесия. Показано, что аналогичный шаговый процесс можно осуществить с заряжающейся емкостью или при сжатии идеального газа.

Тепловая машина с магнитным полем. Eine Wackelmaschine. Ein Beitrag zur Belebung des Physikunterrichts. Quast Ulrich. *“Naturwiss. Unterr. Phys./Chem.”* 1985. 33, № 1. С 10–11. [РЖ 1985 7А94].

Описана конструкция оригинального теплового двигателя, заимствованная из учебного пособия по физическому эксперименту, выпущенного в 1912 г. Шарнирно закрепленный за один конец отрезок железной проволоки помещается вблизи постоянного магнита, так что при комнатной температуре он притягивается к магниту и находится в горизонтальном положении. К проволоке подносится горящая свеча, которая раскаляет проволоку докрасна. Температура проволоки при этом оказывается выше температуры Кюри, она размагничивается и опускается в вертикальное положение. По мере остывания магнитные свойства проволоки восстанавливаются, и она снова притягивается к магниту. При удачном взаимном расположении магнита, свечи и проволоки последняя непрерывно совершает колебания. Приведен вариант двигателя, в котором диск из ферромагнитного материала, помещенный над стоящими друг за другом постоянным магнитом и свечой, совершает непрерывное вращение в горизонтальной плоскости. Даны рекомендации по применению магнитного теплового двигателя в учебном процессе в курсе физики средней школы.

Некоторые гидродинамические опыты в учебном эксперименте. Саранин В.А. *Пробл. учеб. физ. эксперим.* 1995. №1. 90-91. [РЖ 1997 12А161].

Рассмотрена работа по исследованию неустойчивости тяжелой жидкости над более легкой и равновесие мыльной пленки, натянутой на два проволочных кольца.

Использование модели кристаллов при выполнении лабораторной работы “Исследование структуры поликристаллов”. Маджитов А. А. *Тезисы докл. III конф. стран содружества “Соврем. физ. практикум”.* 1995. Москва. С. 136–137.

Использование модели кристаллов при выполнении лабораторной работы “Метод вращающегося кристалла”. Маджитов А.А. *Тезисы докл. III конф. стран содружества “Соврем. физ. практикум”.* 1995. Москва. С. 137–138.

Определение параметров газов с помощью импульсных акустических труб. А.С. Золкин. *Тезисы докл. III конф. стран содружества “Соврем. физ. практикум”.* 1995. Москва. С. 145.

Устройство гидростатического компенсатора давления для измерения коэффициентов диффузии газов. Косов Н.Д., Поярков И.В. *Измерит. техн.* 1995. № 12. 50–51. [РЖ 1997 1А93].

Описана экспериментальная установка по определению коэффициентов для газов стационарно-проточным методом, содержащая систему компенсации давления для уравнивания перепада давления на концах диффузионного канала и позволяющая изменять недиффузионную составляющую массоперено-

са. Предложено устройство компенсации давления, основанное на зависимости давления от высоты столба жидкости, а не от вида диффундирующих газов.

Принципы построения лабораторного практикума по молекулярной физике и термодинамике. М.Б. Шапочкин, П.П. Щербаков. *Физ. образ. в вузах.* 1997. Т. 3. № 3. С. 69–72.

В состав универсального комплекта лабораторного оборудования, изготовленного НТЦ ЛАБЭКС, входят 9 лабораторных установок: 1) Исследование статистического распределения Максвелла термоэлектронов. 2) Проверка абсолютной шкалы температур Кельвина газовым термометром постоянного объема. 3) Определение средней длины свободного пробега молекул воздуха и коэффициента внутреннего трения. 4) Физические основы вакуума. 5) Измерение изменения энтропии и удельной теплоты кристаллизации олова. 6) Измерение коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой нити. 7) Определение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении методом протока. 8) Определение C_p/C_v методом Клеймана-Дезорма. 9) Опыт Джоуля-Томсона.

Задачи теории протекания в учебных экспериментах курса физики конденсированного состояния вещества. С.Д. Ханин, Д.А. Потапова. *Физ. образ в вузах.* 1999. Т. 5. № 4. С. 136-141.

Предлагается методика изучения задач теории протекания, лежащей в основе современной теории сильно неоднородных и структурно разупорядоченных систем. Показано, что решение этих задач может быть осуществлено в форме учебных исследовательских заданий, включающих в себя натурный эксперимент, физическое и компьютерное моделирование.

Изучение теплового насоса Пельтье. Драпкин М.А. *Вестник Челябинского гос. пед. ун-та.* Сер. 4. 2001. № 4. 66–69. [РЖ 05.02-18А.112].

Использование эффекта Пельтье для нужд энергетики, холодильной и других областей техники предложено и частично реализовано А.И. Иоффе. Стандартные термоэлектрические устройства на основе теллуридов давно зарекомендовали себя в различных областях техники, где они успешно конкурируют с фреоновыми. Работа посвящена исследованию теплового насоса, работающего на основе эффекта Пельтье. Для моделирования собрана экспериментальная установка, основными структурными элементами которой являются плоские термоэлектрические преобразователи на BiTe. Дана принципиальная схема экспериментальной установки (калориметра).

Подавление неустойчивости Релея-Тейлора на быстро осциллирующей во времени границе раздела двух жидкостей. Иванов А.А., мл., Поволоцкая Г.В., Переславцев А.А. *Физ. образ. в вузах.* 2001. 7. № 3. 51-65, 192. [РЖ 02.12. 18А. 105].

Изложены физические аналогии между развитием неустойчивости Релея-Тейлора и колебаниями механического маятника. Приведено решение с помощью методов Флоке механической задачи о стабилизации маятника – проблема, рассмотренная с помощью эффективного потенциала П.Л. Капицей. Рассматривается возможность подавления неустойчивости Релея-Тейлора на быстро осциллирующей во времени границе раздела двух жидкостей подобно неустойчи-

ности перевернутого маятника. Приведены критерии стабилизации для случая идеальной жидкости и малых высокочастотных осцилляций. Приводятся результаты экспериментов по стабилизации неустойчивости Релэя–Тейлора. Идея экспериментов может быть использована для постановки задачи в физическом практикуме.

Обзор лабораторных работ по изучению свойств воды. Абраменко М.Г. *Общеросс. межвуз. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных “Наука и образование”*. Томск, 23-26 апреля, 2001. Т. 1. Естественные и точные науки. Мурманск, 2003. 4–8. [РЖ 04.05-18А.169].

Determination of Blood Flow Velocity Using the electromagnetic Measurer. [Измерение скорости потока крови]. Koumykov V.K., Gouketlov Kh.M. *ФОВ-2001*. Т. 7, № 1. С. 91–93.

Описаны учебные эксперименты для физического практикума, в которых используется манометрический метод, основанный на применении газовых законов. В целях упрощения конструкции установки и большей безопасности в условиях учебной лаборатории жидкостный манометр можно заменить точным пружинным манометром или вакуумметром.

Лабораторный эксперимент при изучении жидких кристаллов в средней школе как фактор формирования операциональности знаний. Зарудный А.А., Полях Н. Ф. *ФССО-01. Шестая Межд. конф. Тезисы докл. Том Поставль*. 2001. С. 176–177.

Установка для изучения явлений гидродинамики. Талагаев Ю.В., Филатов Ю.А. *Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения. Седьмая Всеросс. конф.* Глазов. 2002. С. 28–29.

Предложена многофункциональная установка для комплексного изучения волновых процессов и гидродинамических неустойчивостей. Установка проста в изготовлении, не содержит дефицитных деталей и позволяет проводить большое число демонстраций и лабораторных работ.

Экспериментальная оценка подвижности ионов в воздухе. Шефер Н.И., Кузнецов И. С., Филатов В. М. *Учеб. физ.* 2002. № 2. 21–26, 64. [РЖ 03.10-18А.161].

Существует несколько методов определения подвижности носителей зарядов в газах. Авторы усовершенствовали метод Чаттока–Раттнера оценки подвижности ионов посредством измерения давления, создаваемого «электрическим ветром», возникающим при коронном разряде. В статье предлагается лабораторная работа по определению подвижности ионов в воздухе путем измерения скорости электрического ветра терморезисторным анемометром.

Компьютерная лаборатория физики. Молекулярная физика, термодинамика. Составители: Хромов В.И., Кузнецов В. М. Изд-во РХТУ, 2002. 127с. [РЖ 04.02-18А.139К].

Сборник лабораторных работ предназначен для студентов РХТУ им. Д.И. Менделеева и включает работы практикума по курсу общей физики из раз-

делов «Молекулярная физика» и «Термодинамика». Выполнение заданий практикума предполагает использование компьютерной техники в режиме имитационного эксперимента с последующей компьютерной обработкой экспериментальных данных. Электронные версии компьютерных программ допускают индивидуальное применение с использованием переносного компьютера при самостоятельной внелабораторной работе, а также применение в локальной университетской (кафедральной) сети и в глобальной сети ИНТЕРНЕТ в режиме дистанционного обучения.

Определение концентрации водорода в металлах на классическом приборе Гофмана. В.В. Ларионов, А.М. Лидер, И.П. Черепанов. *Физ. образ. в вузах.* **2003.** Т. 9. № 2. С. 91–95.

Рассматривается проблема применения известных классических приборов для демонстрации новых научных достижений в области современной физики и их внедрения в учебный процесс, что позволяет достаточно просто использовать информационные технологии “прямого доступа”. Прибор Гофмана представляет собой три сообщающихся сосуда, из которых два заканчиваются кранами, а средний – воронкой, через которую сосуды наполняются электролитом. На крайних сосудах нанесены деления, позволяющие измерять объем, а на среднем – деления для измерения высоты. Прибор наполняется раствором LiOH, KOH или NaOH и включается в цепь, содержащую измерительные приборы (миллиамперметр) и стабилизированный источник питания. Катод представляет собой съемный электрод, который опускают в раствор щелочи с помощью диэлектрической нити. Условие равновесия для среднего и крайнего сосудов позволяет вычислять давление водорода при известном давлении паров воды при данной температуре, что, в свою очередь, позволяет вычислять число выделившихся ионов водорода.

Капиллярный сифон как прибор физического практикума. Свиридов В.И. *Препоод. физики в высш. шк.* **2003.** № 25. 50–62. [РЖ 05.01-18А.143].

Дано описание четырёх опытов с использованием окрашенных растворов в капиллярных сифонах. Опыты не требуют абсолютно сложного лабораторного оборудования и могут быть рекомендованы для школьного лабораторного практикума и для самостоятельных индивидуальных занятий научно-исследовательской работы школьников и студентов.

Диффузия чернил в воде. Ink diffusion in water. Lee S., Lee H.Y., Tseng C.Y. *Eur. J. Phys.* **2004.** 25, № 2. 331–336. [РЖ 05.06-18А.139].

Динамическая стабилизация релей-тейлоровской неустойчивости и динамическое равновесие. Иванов А.А.(мл), Поволоцкая Г.В. *Физ. образ. в вузах.* **2004.** 10, № 2. 67–75, 127. [РЖ 05.02-18А.108].

Предлагается лабораторная работа по динамической стабилизации релей-тейлоровской неустойчивости на поверхности двух жидкостей. Экспериментально стабилизацию можно получить, например, в системе, состоящей из водного раствора йодида калия (плотность $\rho_h = 1,6 \text{ г/см}^3$) в качестве тяжелой жидкости и масла (вязкость $140 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, плотностью $\rho_h = 0,9 \text{ г/см}^3$) в качестве легкой жидкости. Параметрические резонансы при этом оказываются подавленными, но их можно наблюдать при использовании масла с более низкой вязкостью.

Виртуальный практикум по молекулярной физике и термодинамике. П.П. Щербаков, А.Ю. Косов. *Совр. физ. практикум. IX Межд. уч.-методич. конф. 2004.* Волгоград. С. 119–124.

Данный компьютерный практикум предназначен для очной формы обучения. Он позволяет студенту подготовиться к выполнению работы на реальной установке, а также выполнить виртуальную лабораторную работу при отсутствии экспериментальной базы. В состав компьютерного практикума входят работы:

Определение теплопроводности воздуха методом нагретой нити.

Определение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении методом протока.

Определение отношения теплоемкостей воздуха.

Определение коэффициента теплопроводности твердых тел методом цилиндрического слоя.

Проверка температурной шкалы Кельвина.

Изучение эффекта Джоуля-Томсона и определение констант в уравнении Ван-дер-Ваальса.

Определение коэффициента внутреннего трения воздуха при различных температурах.

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости при различных температурах методом Стокса.

Определение удельной теплоты кристаллизации и изменения энтропии при охлаждении олова.

Применение материалов с дефектом памяти формы в лабораторном практикуме по физике. Вашленко А.Ю. Безрядин Н.Н. *Учеб. физ. 2004.* № 4. 45–49. [05.08-18А.115]

Для моделирования газообразного рабочего тела предлагается использовать монокристаллы сплава с дефектами памяти формы и псевдоупругости. Приведено описание двух новых лабораторных работ по изучению цикла работы тепловой машины и фазовых превращений в твердом состоянии.

Физический практикум. Статистическая физика: Учебное пособие. Кувшинов В.В., Акиньшин В.С., Андреянова Р.П., Браун А.Г. М: Изд-во «МАТИ»-РГУ. 2004. [05.04-18А.134К].

В пособии собраны руководства к лабораторным работам цикла «Статистическая физика» физического практикума «МАТИ» – Российского государственного технологического университета им. К.Э. Циолковского. Пособие состоит из трёх глав и Приложения. Первые две главы – теоретические. Даны основные понятия теории вероятности в объёме, необходимом для выполнения лабораторных работ. Третья глава содержит руководства к трём лабораторным работам. Каждое руководство состоит из изложения цели работы, теоретических основ физических явлений, изучаемых в лабораторной работе, описания экспериментальной установки и подробного описания последовательности действий при проведении эксперимента. Кроме того, в каждой работе дано по 30 контрольных вопросов, предназначенных для самоконтроля студентов. В Приложении дана таблицы коэффициентов Стиюдента, позволяющих рассчитать полуширину до-

верительного интервала (абсолютную погрешность) измеряемой величины. Посobie предназначено для студентов всех специальностей.

Образование капель в падающем потоке жидкости. Drop formation in a falling steam of liquid. Grubelnik V., Marhk Marco. *Amer. J. Phys.* **2005.** 73, № 5. 415–419. [РЖ 07.01-18A.87].

Сужение падающего потока жидкости является хорошо известной демонстрацией уравнения непрерывности. Рассматривается поведение нижней части падающего потока жидкости, когда поток перестает сужаться и происходит образование капель. Образование капель иллюстрируется подробными экспериментальными фотографиями. Приводится простое математическое описание, включающее основные процессы, отвечающие за образование капель.

Экспериментальное исследование уравнение Бернулли без потери энергии. Experimental study of Bernoulli's equation with lasses. Saleta Martin Eduardo, Tlkia Dina. Gil Salvador. *Amer. J. Phys.* **2005.** 73, № 7. 598–602. [РЖ 07.04-18A.133].

Учебный физический эксперимент по теории протекания в лабораторном практикуме педагогического вуза. А.Ю. Дашина, В.Г. Соловьев, С.Д. Ханин, В.А. Шаронов. *Проблемы учеб. физ. эксп-та.* Вып. 24. Москва. **2006.** С. 37–38.

В работе рассматриваются известные из литературы и предложенные авторами учебно-исследовательские задания для студентов физических специальностей педагогических вузов, включающие в себя физическое и компьютерное моделирование перколяционных процессов и определение порогов протекания для задачи узлов и задачи связей.

Создание вращения жидкости: круговое вращение слабопроводящей жидкости, индуцированное силой Лоренца. Making a fluid rotate: Circular flow of a weakly conducting fluid induced by a Lorentz body force. Digilov Rafael M. *Amer. J. Phys.* **2007.** 75. № 4. 361-367. [РЖФиз. 09.02-18A. 108].

Описывается магнитогидродинамическое (МГД) течение вязкой, электрически проводящей, несжимаемой жидкости под действием силы Лоренца внутри плоского кольца между двумя стационарными коаксиальными цилиндрическими электродами с наложенными электрическим и магнитным полями. Показано, что для чисел Хартмана $H_a \leq 1$ МГД поток ведет себя как обычный гидродинамический поток под действием азимутальной силы Лоренца.

Учебная лаборатория “Физика низких температур”. Е.С. Платонов, И.В. Баранов. *Физ. образ. в вузах.* **2007.** Т. 13. № 4. С. 121-127.

Представлено описание учебной лаборатории “Физика низких температур”, созданная на базе 14 многофункциональных учебных стендов. В состав учебного стенда входят тепловые ячейки, специализированный контроллер и температурные датчики. В данной лаборатории осуществляется подготовка бакалавров, специалистов и магистров по специальности “Техника и физика низких температур”.

Простые лабораторные работы по гидромеханике вязкой и несмачивающей жидкости для бакалавров и магистров. ФСС0-07. *Материалы IX Межд. конф.* С.-Петербург. Т. I. 2007. С. 385.

Первой лабораторной работой предлагаемого цикла является лабораторная работа “Изучение вытекания вязкой и несмачивающей жидкости из отверстия в вертикальной стенке открытого сосуда”. Открытость сосуда предполагает, что давление сверху сосуда и давление в точке вытекания сбоку сосуда одинаково и равно атмосферному давлению. В данной работе требуется найти, наряду со скоростью вытекания вязкой и несмачивающей жидкости из сосуда, площадь сечения сжатой струи, которая меньше площади сечения отверстия в сосуде, расход жидкости и коэффициент сжатия струи. В других работах исследуется вытекание воды из тонкостенных пластмассовых бутылок с разным количеством отверстий. Скорость истечения струи находится экспериментально и сравнивается с найденной теоретически на основании уравнения Бернулли.

Измерение осмотического давления. А.А. Теврюков, В.В. Усков, Ф.Ф. Игошин. МФТИ. *Физ. образ. в вузах.* 2009. Т. 15. №. 3. С. 48–55.

Приводится описание лабораторной работы по измерению осмотического давления, методика проведения опытов и результаты эксперимента.

Глава 13

СБОРНИКИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ

Лабораторные работы по физике. Т. 2. Теплота, магнетизм и электричество. Линдстрем, Юнгквист. Laborationer I fysik. D. 2. Varmelara, magnetism och ellara. Lindstrom Ragnar, Lyungquist Sven. Gavle, Skolforl, Gavle. 1958, 32 s. [РЖФиз. 1960 № 8 18933].

Физический практикум. Ч. I. Первая физическая лаборатория. Механика и молекулярная физика. Ред. Большанина М.А. Томск. Томский ун-т. 1959. 137 с. [РЖФиз. 1960. № 6. 12977К].

Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Сост.: Л. Л.Гольдиным, С.М. Козелом, Н.Н. Колачевским и др.Изд. “Наука”. М., 1964.

Новые опыты для I физического практикума. Теплота и молекулярная физика. Szydlowsky Henryk. Nowe doswiadczenia dia I pracowni fizycznej. Cieplo I fizyka drobinowa. “Postepy fiz.”, 1969, 20, № 1, 93-105. [РЖ 1969 9А89].

Статья представляет собой продолжение ранее напечатанной статьи (РЖФиз, 1967Ю 4А78). Кратко описаны 11 лабораторных работ по теплоте в I физическом практикуме на кафедре экспериментальной физики университета им. Мицкевича в Познани и которые являются мало известными в литературе или же выполняются на установках, в которые внесены некоторые изменения по сравнению с известными установками. Описаны работы по определению коэффициента линейного расширения, измерению удельной теплоемкости воздуха, удельной теплоемкости и термического коэффициента сопротивления меди, коэффициента теплопроводности металлов и стекла, вязкости воздуха, определению массы молекулы сахара, исследованию броуновского движения и определению диаметра броуновских частиц и т. д.

Некоторые лабораторные работы по молекулярной физике. Кимбардин М. А. “Уч. зап. Перм. гос. пед. ин-та.” 1969. 72, 59-62. [РЖ 1971 12А94].

Лабораторные работы практикума по молекулярной физике в Щадринском пединституте разбиты на 3 цикла по 5-6 работ в каждом: молекулярно-кинетическая теория и ее следствия, свойства реальных тел, законы термодинамики. При постановке работ используется по возможности более современное оборудование, чем это указано в соответствующих пособиях. В качестве примера описана лабораторная работа по определению числа Авогадро сцинтилляционным методом с использованием нового оборудования.

Физический практикум: молекулярная физика. Збаровский А. В., Игнатъев А. А. – Саратов. Изд-во ун-та, 1993.-98 с. [РЖ-1994 1А65К].

Издание является учебно-методическим пособием по физическому практикуму «Молекулярная физика», созданным на кафедре общей физике Саратов-

ского Государственного Университета. В пособии содержатся описания лабораторных работ в соответствии с программой по курсу общей физики для университетов. Изложенные в лабораторных работах теоретические замечания, порядок выполнения работ, описание устройств экспериментальных установок, а также приведенные в приложениях табличные данные достаточно полно охватывают необходимый для подготовки материал. Тем не менее, в конце каждой работы приведен библиографический список, обращение к которому может помочь уяснению сложных теоретических вопросов.

Многоуровневый лабораторный практикум по молекулярной физике. Мельников В.В., Шапочкин М.Б., Щербаков П.П. *Тезисы докл. III конф. Стран содружества "Совр. физ. практ-м"*. Москва. 1995.

Развитие идеи лабораторного практикума по физике *вуза* привело к созданию концепции трехуровневого лабораторного практикума. Первый уровень – лабораторные работы для базовой подготовки, классические эксперименты, техническая реализация которых максимально упростила работу студентов. Второй – лабораторные работы повышенной сложности дисциплинарно ориентированные. Третий уровень – лабораторные установки позволяют реализовать элементы научных исследований; лабораторные занятия длительные, проводятся вне сетки расписания. Если отнесение лабораторных установок к третьему уровню очевидно, то разбиение на первый и второй уровень достаточно условно и определяется методикой эксперимента и сложностью задания.

Лабораторные установки выполнены в виде отдельных лабораторных работ, ориентированных на использование универсальной приборной базы. Она включает источник постоянного напряжения, милливольтметр и микрокомпрессор. Практикум содержит 9 лабораторных установок и 5 приборных баз.

К первому уровню можно отнести:

1) Определение удельной теплоты кристаллизации и изменения энтропии при охлаждении олова. Измеряется температура и время охлаждения. Строят кривую охлаждения, определяют время и температуру кристаллизации.

2) Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса. Измеряется время падения шариков известного диаметра и плотности в жидкости с различных высот. По формуле Стокса рассчитывается коэффициент внутреннего трения.

3) Определение отношения теплоемкостей методом Клеймана-Дезорма.

В работе измеряется время, в течение которого открыт клапан (изобарный процесс) и перепад давлений после закрытия клапана (изохорный процесс). Измерения проводятся для различных значений времени.

4) Определение коэффициента внутреннего трения воздуха и средней длины свободного пробега молекул воздуха. В работе измеряется время истечения заданного объема воздуха через капилляр и изменение давления во время истечения. Коэффициент трения рассчитывается по формуле Пуазейля.

Ко второму уровню относятся лабораторные работы:

5) Измерения коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой нити. Измеряется электрическая мощность, выделяемая на металлической нити, температура нити и температура воды в термостате. При расчете теплопроводности используется методика Глестона и Манна с условием постоянства температуры трубки с нагретой нитью.

6) Определение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении методом протока. Проводятся измерения разности температур на выходе и входе рабочего участка кварцевой трубки, внутри которой размещается нагреватель, подводимая электрическая мощность к нагревателю, массовый расход воздуха через трубку. Измерения проводятся при различных перепадах температур.

7) Исследование статистического распределения на примере термоэлектронов. Методом задерживающей разности потенциалов измеряется ток анода пентода. В результате дифференцирования анодной характеристики получают функцию распределения термоэлектронов по энергиям. Анализируется применимость распределения Максвелла для описания распределения, рассчитываются характерные параметры распределения.

К третьему уровню можно отнести лабораторные работы:

8) Опыт Джоуля–Томсона. Измеряется зависимость перепада температур на пористой перегородке от перепада давлений при истечении газа. При обработке экспериментальных данных рассчитываются константы уравнения Ван-дер-Ваальса. Установка позволяет проводить измерения с различными пористыми перегородками для различных газов.

9) Определение КПД нагревателя. Резистивный нагреватель помещен в адиабатную оболочку, соединенную с U-образным манометром. В работе измеряется энергия, подводимая к нагревателю, работа газа и температура газа. Используя первое начало термодинамики, находят количество тепла, переданное газу нагревателем. Находится КПД нагревателя как отношение тепла, переданного газу, к энергии, потребляемой нагревателем. Во время эксперимента U-образный манометр можно либо соединить с атмосферой, либо замкнуть. Исследуется зависимость теплопотерь системы во времени.

Лабораторный практикум по курсу “Молекулярная и статистическая физика. Термодинамика”. Попов С. Е. *ФССО-01. Шестая Межд. конф.* Ярославль. 2001. С. 179-180.

Практикум состоит из четырех циклов: Введение в статистическую физику; Основы термодинамики; Свойства фаз и фазовые переходы; Явления кинетики и неравновесной термодинамики. В каждом цикле подобрано 5-6 работ, часть из которых заимствована из традиционного практикума, а часть являются оригинальными. Так, в первом цикле предложены следующие работы: Определение размеров молекул; Изучение распределения Гаусса; Распределение термоэлектронов по скоростям; Распределение Больцмана; Изучение функции распределения фотоэлектронов.

Новые лабораторные работы по молекулярной физике. П.П. Щербаков. *Совр. физ. практикум. Труды VIII Межд. уч.-методич. конф.* Москва. 2004. С. 90.

Предлагаемые работы по молекулярной физике основаны на новых технических решениях, с использованием современных материалов и приборов при создании лабораторных установок. Это расширяет возможности лабораторных установок и позволяет провести на них многоуровневый эксперимент с приемлемой погрешностью студентами, изучающими курс общей физики в технических и педагогических университетах. Лабораторные установки надежны и просты в эксплуатации. Перечень работ и применяемые методики:

1. Установка для изучения эффекта Джоуля-Томсона и определения констант в уравнении Ван-дер Ваальса. В работе измеряются давление и температура воздуха на входе дросселя. Определяется коэффициент адиабатного дросселирования воздуха при перепадах давления на дросселе (гильза с войлочной набивкой) до 10 бар, рассчитываются постоянные Ван-дер Ваальса для воздуха.

2. Определение коэффициента диффузии воздуха через мелкопористые керамические перегородки. В работе измеряется давление в пористой емкости, температура и расход воздуха. Проверяется соотношение Кнудсена и определяется коэффициент самодиффузии воздуха через мелкопористую стенку.

3. Установка для определения коэффициента внутреннего трения воздуха при различных температурах. В работе измеряется перепад давления при течении нагретого воздуха через капилляр круглого сечения, температура воздуха и его массовый расход. Проверяется классическая теория явления переноса импульса при ламинарном течении газа, при его нагревании до 473 К.

4. Установка для определения коэффициента внутреннего трения жидкости при различных температурах методом Стокса. В работе определяется зависимость динамической вязкости жидкости от температуры. Проверяется формула Андраде для жидкости.

Лабораторный практикум по статистической физике для технических вузов. В.И.Богданов, А.А. Босенко. *Совр. физ. практикум. Труды VIII Межд. уч.-методич. конф.* Москва. **2004.** С. 110.

Предлагаемый практикум состоит из 9 работ.

Элементам классической статистики посвящены три лабораторные работы:

Изучение распределения Гаусса. Эта работа использует механические модели и дает представление о статистических распределениях.

Определение длины свободного пробега молекул воздуха – позволяет рассмотреть модель идеального газа в молекулярно-кинетической теории и анализировать явление переноса.

Изучение распределения Максвелла – одна из наиболее ясных для студентов задач в классической статистике.

В разделе “Конденсированное состояние вещества” представлены две работы по тепловому расширению твердых тел, в которых измеряется коэффициент линейного расширения стержня и проволоки, а также работы:

Изучение термоэлектронной эмиссии и определение работы выхода электрона. Для объяснения опытных данных используется квантовая модель свободных электронов в металлах, представление о функции распределения Ферми и энергии Ферми.

Исследование эффекта Зеебека – В этой работе для объяснения термоэдс используется та же модель электронного газа.

Изучение температурной зависимости сопротивления полупроводников и определение энергии активации – эта работа дает возможность обсуждения важнейшей темы о зонной структуре твердых тел и теории полупроводников.

Третий раздел – “Порядок и беспорядок в природе” – представлен работой “Наблюдение диссипативной структуры”, объектом исследования в которой является реакция Белоусова–Жаботинского.

Лабораторный практикум по физике твёрдого тела в курсе молекулярной физики и термодинамики. Смирнова Т.П., Евдокимова Л.А. *Физика диэлектриков (Диэлектрики-2004) Материалы 10 международной конференции*. С.-Петербург 23–27 мая 2004. СПб. 2004. 450–451. [РЖ 05.11–18А.126].

Разработан лабораторный практикум, посвящённый углубленному изучению тепловых свойств твёрдых тел в рамках общего курса физики. Для проведения практикума использованы как типовые приборы, так и самодельные установки. Практикум включает три лабораторные работы: 1) Определение удельной теплоёмкости твёрдых тел; 2) Определение коэффициента теплопроводности твёрдых тел; 3) Линейное расширение твёрдых тел. Отличительной особенностью учебно-методического пособия в условиях дефицита времени, отводимого на лекционный курс по молекулярной физике и термодинамике, является наличие перед каждой лабораторной работой подробного теоретического введения. Рассмотрены доступные для восприятия на младших курсах модели теплового движения и сил взаимодействия частиц твёрдого тела. Приведено и систематизировано большое количество экспериментальных фактов, позволяющих проследить возможности и ограничения теории, построенных на различных моделях. Практикум предназначен для студентов-физиков 1–2 курса по специальности “Учитель физики средней школы”.

Новый учебно-методический комплекс лабораторных работ общего физического практикума по молекулярной физике. Жолнеревич И.И., Филипп А.Р. *Физическое образование в вузах*. 2005. 11. №1.36–40, 99. [05.10–18А.127].

Для лабораторного практикума по курсу «Молекулярная физика» разработаны установки для изучения теплопроводности газов, фазовых переходов первого и второго рода и некоторые другие. Представлен новый комплекс лабораторных работ по молекулярной физике для вузовского курса общей физики. Содержание каждой лабораторной работы состоит из инвариантной и вариативной частей, что позволяет учитывать специфику вуза и особенности учебных планов. Обсуждается методика выполнения студентами лабораторных работ на новых приборах.

Лабораторный практикум углубленного изучения молекулярной физики и термодинамики в Новгородском государственном университете (Нов.ГУ). Смирнова Т.П., Евдокимова Л.А. *Физика в системе современного образования: ФССО-05: Труды 8 Международной конференции*, С.-Петербург 29 мая–3 июня 2005. СПб. 2005. 53–55. [РЖ 06.12–18А.142].

Наряду с общеобразовательным физическим практикумом для инженерных и естественнонаучных специальностей на кафедре общей и экспериментальной физики НовГУ разработан и используется физический практикум по молекулярной физике и термодинамике, который предназначен для углубленного изучения этого раздела студентами направления “Физика” и специальности “Учитель физики средней школы”. Отдельные работы используются на естественнонаучных направлениях медицинского и сельскохозяйственного профиля. Лабораторный практикум включает 10 работ, для выполнения которых используются недорогостоящие установки, некоторые из них являются самодельными. Отличительной особенностью методических руководств к лабораторным рабо-

там является обсуждение различных моделей строения вещества, характера теплового движения и сил взаимодействия его частиц. Большинство работ включает приложения, расширяющие рамки общего курса физики. Имеются дополнительные задания, основанные на теоретическом материале приложений.

Общезначимый лабораторный практикум по молекулярной физике в техническом университете. Левченко В.П., Повзнер А.А. *Школа и вузы: достижения и проблемы непрерывного физического образования: Сборник научных трудов 4 Российской научно-методической конференции учителей школ и преподавателей вузов.* Екатеринбург, 2006. Екатеринбург.2006.99-103. [РЖ 07.10-18А.131].

Практикум, включающий двадцать лабораторных работ, рассматривает такие объекты исследования, как твердые, жидкие и газообразные вещества. Довольно широко охватывает статистические и термодинамические закономерности поведения системы, состоящей из большого числа частей, явления переноса в жидкостях и газах. Практикум снабжен списком соответствующей методической литературы, пакетом тестовых контролирующих программ, компьютерным сопровождением.

Цикл работ лабораторного физического практикума по изучению газодинамических характеристик воздушных потоков. Зудин Б.В., Коршаковский С.И., Красненков М. А. *ФССО-07. Материалы IX Межд. конф.* С.-Петербург. 2007. С. 73–72.

В работах определяется относительная скорость твердого тела в неподвижной и подвижной газовых средах, измеряется скоростной (динамический) напор с помощью трубок Пито и Прандтля, исследуются стационарные течения несжимаемой жидкости методом трубок тока и одновременно решается ряд смежных задач. При исследовании скоростных потоков в газовой среде используются источники и приемники ультразвуковых волн, создающие бегущие навстречу друг другу волны с различными параметрами (амплитуда, частота, длина волны). Измерение механического давления основано на использовании пьезоэффекта, преобразующего силовые воздействия в акустическом поле в электрические сигналы, позволяющие определять временные интервалы при прохождении акустических волн в различных, в том числе и в противоположных направлениях.

Глава 14

ДОПОЛНЕНИЕ

В “Часть I. Механика” настоящей книги не вошла информация (по техническим причинам) о следующих лабораторных работах, которые являются основополагающими в истории развития общего физического практикума.

Изучение нониусов. А.П. Соколов. Физический практикум. Руководство к практическим работам по физике. Часть первая. Общая физика. Теплота. Акустика. Общая физика. Издание второе, дополненное и переработанное проф. А.П. Соколовым и проф. К.П. Яковлевым. М.-Л. 1926. Задача 1. С. 41. 1937, 1938. Задача 1. С. 85.

Определение толщины пластинки и радиуса кривизны линзы сферометром. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Задача 2. С. 44. 1937, 1938. Задача 2. С. 89.

Изучение законов падения тел на приборе Атвуда. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Задача 3. С. 47. 1937, 1938. Задача 3. С. 91.

Определение напряжения тяжести посредством маятника. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Задача 4. С. 49. 1937, 1938. Задача 4. С. 94.

Точное взвешивание. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Задача 5. С. 57. 1937, 1938. Задача 5. С. 100.

Определение плотности твердых тел пикнометром и гидростатическими весами. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Задача 6. С. 65. 1937, 1938. Задача 6. С. 107.

Определение плотности жидкостей пикнометром, гидростатическим весами и весами Вестфаля. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Задача 7. С. 68. 1937, 1938. Задача 7. С. 109.

Определение плотности жидкостей по способу сообщающихся сосудов. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Задача 8. С. 73. 1937, 1938. Задача 8. С. 114.

Определение плотности газов методом Бунзена. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Задача 9. С. 76. 1937, 1938. Задача 9. С. 117.

Определение модуля Юнга из растяжения и (изгиба). А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Работа 14. С. 95. 1937, 1938. Работа 10. С. 122.

Определение модуля кручения и модуля сдвига. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Работа 15. С. 104.

Определение модуля сдвига по модулю кручения. А.П. Соколов. Физический практикум. 1937. Работа 11. С. 132.

Определение модуля сдвига из кручения проволоки. А.П. Соколов. Физический практикум. 1938. Работа 11. С. 132.

Определение скорости звука в твердых телах методом Кундта. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Работа 144. С. 76. 1937, 1938. Работа 27. С. 197.

Определение скорости звука в газах методом Кундта. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Работа 24. С. 146. 1937, 1938. Работа 28. С. 199.

Определение скорости звука в газах методом интерференции и методом стоячей волны по Квинке. А.П. Соколов. Физический практикум. 1926. Работа 25 С. 148. 1937, 1938. Работа 29. С. 200.

В.И. Козлов

**АНТОЛОГИЯ
ОБЩЕГО ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА
Часть 2
Молекулярная физика**

Подписано в печать _____
Объем 10,75 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ _____

Физический факультет Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова

Отпечатано в отделе оперативной печати
Физического факультета МГУ