

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА:  
ЧАСТЬ 3. ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ**

Практикум для вузов

Составители:  
В.И. Кукуев,  
В.В. Чернышев,  
И.А. Попова.

ВОРОНЕЖ  
2009

Утверждено научно-методическим советом физического факультета  
22 января 2009 года, протокол № 1.

Практикум подготовлен на кафедре общей физики физического факультета  
Воронежского государственного университета.

Рекомендуется для студентов физического факультета 1 курса д/о и 2 курса  
в/о. Для специальностей: 010701 (010400) – Физика, 010803 (014100) –  
Микроэлектроника и полупроводниковые приборы, 010801 (013800) –  
Радиофизика и электроника.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА  
МЛ-3/1

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА  
ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ**

Цель работы – определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом компенсации разности давлений в капилляре.

ВВЕДЕНИЕ

Поверхность жидкости, налитой в сосуд, имеет кривизну вблизи границы между жидкостью и твердой стенкой сосуда, то есть там, где заметную роль играют силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела. Если размеры сосуда, в котором находится жидкость, сравнимы с радиусом кривизны поверхности жидкости, то такие сосуды называют капиллярными. Явления, происходящие в таких сосудах, называются капиллярными явлениями. Поднятие жидкости в капиллярных трубках, смачивающей стенки трубки, обусловлено возникновением давления, вызванного кривизной поверхности. Согласно формуле Лапласа, это давление равно:

$$P = \frac{\sum f_i}{\Delta S} = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

где  $f_i$  – составляющая силы поверхностного натяжения  $F$ , параллельная направлению  $OO'$  и создающая добавочное давление под кривой поверхностью (рис.1);  $\Delta S$  – площадь элемента поверхности жидкости;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $R_1$  и  $R_2$  – главные радиусы кривизны, то есть радиусы кривизны линий, получающихся в результате пересечения участка искривленной поверхности двумя взаимно перпендикулярными плоскостями, проходящими через нормаль  $n$  к участку  $\Delta S$  ( $n$  совпадает по направлению с  $OO'$ ). Величина  $(1/R_1 + 1/R_2)$  называется средней кривизной поверхности и, как доказано в дифференциальной геометрии, не зависит от выбора пары таких плоскостей.

В частном случае, когда поверхность жидкости имеет сферическую форму,  $R_1 = R_2$  и формула Лапласа имеет вид:

$$P = \frac{2\sigma}{R}, \quad (2)$$

причем сила давления Лапласа всегда направлена к центру кривизны мениска. Под действием этого давления жидкость поднимается в капиллярной трубке (при вогнутом мениске) до уровня  $h$ , при котором гидростатическое давление  $\rho gh$  столба жидкости высотой  $h$  с плотностью  $\rho$  уравновешивает давление. Условием равновесия будет равенство:

$$\frac{2\sigma}{R} = \rho gh. \quad (3)$$

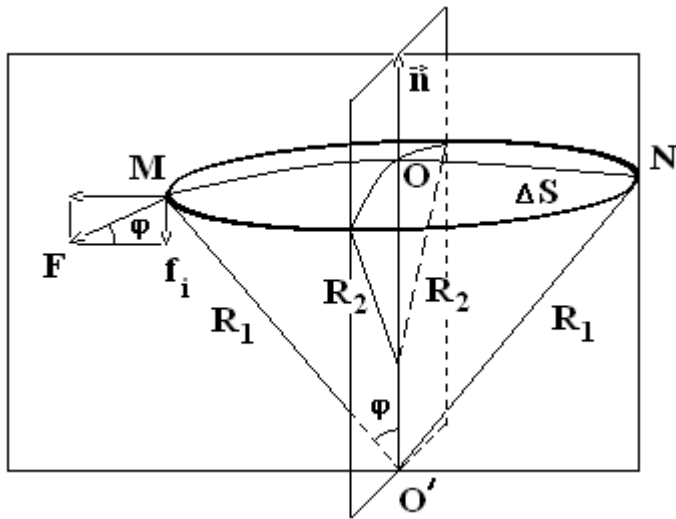


Рис. 1. Схема к выводу формулы Лапласа.

Нетрудно установить связь между высотой  $h$  и радиусом трубки  $r$  (см. рис. 2). Центр сферы, частью которой является мениск, находится в точке  $O$ . Краевой угол жидкости, соприкасающийся со стенками капилляра, равен  $\Theta$ .

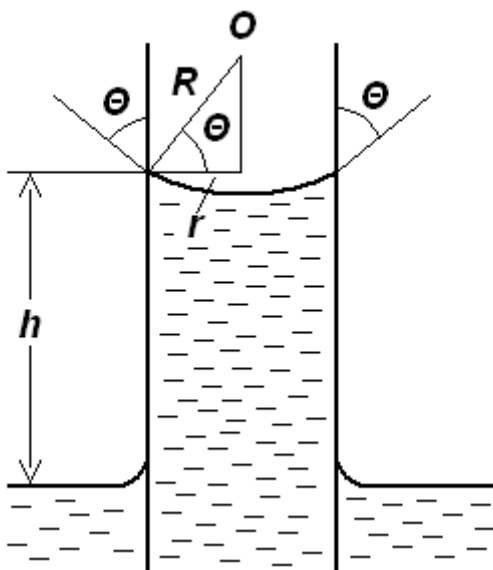


Рис. 2. Смачивающая жидкость в капилляре.

Из рис. 2 следует, что

$$R = \frac{r}{\cos \Theta} .$$

Поэтому равенство (3) переписывается в виде:

$$\frac{2\sigma \cos \Theta}{r} = \rho g h , \quad (4)$$

откуда

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho g h \frac{r}{\cos \Theta} . \quad (5)$$

В случае полного смачивания жидкостью стенок капилляра  $\Theta = 0$ ,  $\cos \Theta = 1$ , имеем:

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho g h r . \quad (6)$$

Однако измерить точно высоту поднятия жидкости в капилляре трудно. В работе используется метод компенсации разности давлений. Если создать в капилляре над жидкостью избыточное давление, то при некотором его значении  $P_{изб}$  уровень жидкости в капилляре сравняется с уровнем жидкости в сосуде. Это избыточное давление можно измерить манометром

$$P_{изб} = \rho_{ж} g H , \quad (7)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность манометрической жидкости,  $H$  – разность высот в коленах манометра. Тогда коэффициент поверхностного натяжения вычисляется по формуле:

$$\sigma = \frac{r \rho_{ж} g H}{2} . \quad (8)$$

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ЗАДАНИЙ

Приборы и принадлежности: установка, набор капилляров, отсчетный микроскоп «МИР-1», исследуемые жидкости.

Установка (рис. 3) представляет собой два специальных столика, на которых размещены: капилляр (1) и сосуд с исследуемой жидкостью (2), широкий стакан с водой (3), спиртовой манометр (4). Широкая металлическая трубка (5) соединяет их, один конец ее с помощью резиновой пробки вставляется в капилляр. Широкий отросток металлической трубки (6) и стакан с водой служат для изменения давления в системе, другой конец трубки присоединен к манометру. Столик (7) можно поднимать и опускать винтом (8).

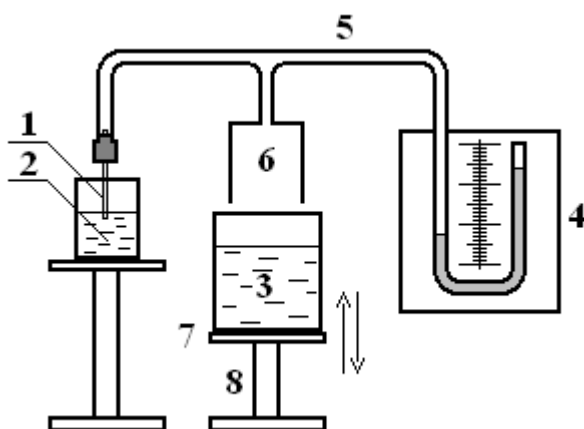


Рис. 3. Схема экспериментальной установки.

Задание 1. Измерение радиусов капилляров с помощью микроскопа «МИР-1».

Микроскоп «МИР-1» и столик для капилляров установлены горизонтально в специальном штативе катетометра. Столик можно перемещать в двух взаимно перпендикулярных направлениях установочными винтами. Перемещение столика в вертикальном направлении осуществляется винтами штатива катетометра.

Окуляр микроскопа «МИР-1» имеет измерительную шкалу, цена давления которой зависит от длины тубуса микроскопа и дана в таблице, прилагаемой к микроскопу. Длина тубуса микроскопа устанавливается по шкале, нанесенной на его трубке.

1. Положить капилляр горизонтально на столик. Установить длину тубуса микроскопа 130-150 мм (по заданию).
2. Перемещая столик винтами, добиться резкого изображения торцевой плоскости капилляра в центре поля зрения микроскопа (рис. 4).
3. Измерить по шкале (с учетом цены ее деления) внутренний диаметр капилляра не менее 3-х раз через каждые  $120^\circ$  при вращении его вокруг собственной оси и вычислить среднее значение радиуса капилляра  $\langle r \rangle$ .
4. Измерение провести для двух-трех капилляров.

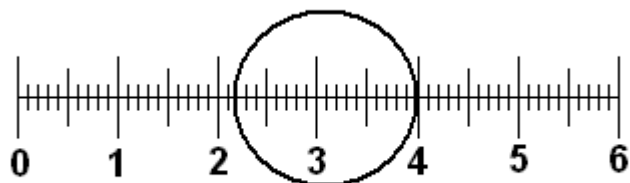


Рис. 4. Схема измерения радиуса капилляра.

#### Задание 2. Измерение высоты поднятия жидкости в капилляре.

1. Промыть капилляр сначала водопроводной, затем дистиллированной водой, а затем исследуемой жидкостью. Установить его с помощью пробки в установку и опустить в сосуд (1) с исследуемой жидкостью (рис. 3).
2. Вращать винт (8), медленно поднимая столик (7); вода заполняет объем отростка (6) и в системе повышается давление.
3. В момент, когда уровень жидкости в капилляре (1) сравнивается с поверхностью исследуемой жидкости, произвести расчет  $H$  разности уровней по манометру.
4. Опыт повторить 5-7 раз, найти среднее значение разности давлений  $\langle H \rangle$ . Результаты измерений записать в таблицу.
5. По формуле (8) вычислить значение коэффициента поверхностного натяжения исследуемой жидкости. Вычислить погрешности измерений, представить результат, указав температуру опыта.

6. Повторить измерения и вычислить коэффициент поверхностного натяжения всех заданных жидкостей. Сравнить результаты. Сделать выводы.

Таблица результатов

$d, \text{ м}$	$\langle r \rangle, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$\sigma, \text{ Н/м}$	$\langle \sigma \rangle, \text{ Н/м}$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кикоин А.К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – М.: Наука, 1976. – 480 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики / Д.В. Сивухин. – М.: Изд-во МФТИ, 2003. – Т.2: Термодинамика и молекулярная физика. – 576 с.
3. Телесин Р.В. Молекулярная физика / Р.В. Телесин. – М.: Высш.шк., 1973. – 360 с.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Природа сил поверхностного натяжения.
2. Поверхностное натяжение и связанные с ним явления: капиллярность, смачивание, несмачивание.
3. Вывод формулы Лапласа.
4. Метод определения коэффициента поверхностного натяжения.
5. Точность данного метода.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Цель работы – определение температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения воды методом Кантора – Ребиндера.

## ВВЕДЕНИЕ

С повышением температуры коэффициент поверхностного натяжения уменьшается. Это следует из того, что при критической температуре он должен быть равен нулю, так как при этой температуре исчезает разница между жидкостью и ее паром.

Однако точный вид зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры не может быть установлен теоретически. Приближенно эта зависимость выражается следующим равенством:

$$\sigma = B(T_k - T)\left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{2/3}, \quad (1)$$

где  $B$  – постоянный коэффициент,  
 $T_k$  – критическая температура,  
 $\rho$  – плотность жидкости,  
 $\mu$  – ее молярная масса.

Из (1) следует, что температурная зависимость поверхностного натяжения, то есть его изменение при изменении температуры на один градус, выражается соотношением:

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta T} = -B\left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{2/3}, \quad (2)$$

Таким образом, зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры тем сильнее, чем больше плотность жидкости и чем меньше ее молярная масса (величина  $B$  практически одинакова для всех жидкостей).

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Приборы и принадлежности: установка для определения температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения жидкостей, термометр, электроплитка, мешалка, стакан.

Метод Кантора – Ребиндера основан на следующем явлении. Рассмотрим условие возникновения и проталкивания пузырька воздуха в жидкость из капиллярной трубки. Если поместить в сосуд с исследуемой жидкостью капилляр с постоянным атмосферным давлением внутри него, а над поверхностью исследуемой жидкости создать разрежение ( $\Delta P = P_1 - P_2$ ), то под кончиком капиллярной трубки возникает пузырек воздуха (рис. 1) вследствие разности давлений  $\Delta P = \rho g H$ . Кроме того, внутри пузырька воздуха возникает давление, обусловленное поверхностным натяжением исследуемой жидкости, которое стремится сжать образующийся пузырек. С



увеличением  $\Delta P$  пузырек увеличивается и при  $\Delta P_{max} \geq 2\sigma/r$  прорывается через поверхность жидкости.

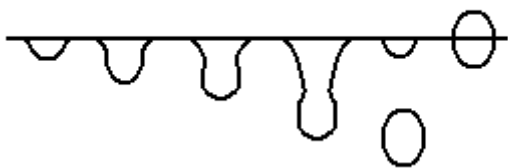


Рис. 1. Образование пузырька воздуха под кончиком капиллярной трубки.

Измерив давление  $\Delta P_{max} \geq 2\sigma/r$ , можно определить коэффициент поверхностного натяжения

$$\sigma = \frac{r}{2} \Delta P . \quad (3)$$

Экспериментальная установка (рис. 2) состоит из сосуда (1) с исследуемой жидкостью, спиртового манометра (2), аспиратора (3), наполненного водой, термометра (4), трехконечной переходной трубки (5), стакана с водой (6) для термостатирования, вращающейся подставки (7).

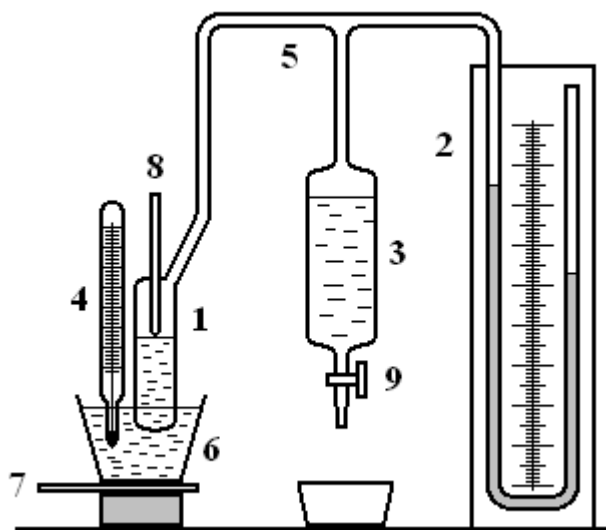


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

Сосуд (1) имеет отросток, соединяющий его с манометром (2) и впаянную трубку (8), один конец которой (капиллярный кончик) касается поверхности жидкости, другой – выходит в атмосферу.

Если открыть кран (9) аспиратора, то вода начнет вытекать, и в системе создается разрежение. При некоторой разности давлений избыток атмосферного давления проталкивает через кончик трубки (8) пузырек воздуха. Используя формулу (1) и учитывая, что разность давлений ( $\Delta P = P_1 - P_2$ ) измеряется манометром  $\Delta P = \rho g H$ , получаем рабочую формулу метода:

$$\sigma = AH . \quad (4)$$

Здесь  $H$  – разность высот уровней жидкости в коленах манометра,  $A = \frac{\rho g r}{2}$  – постоянная прибора, которую легко определить из опыта для жидкости с известным коэффициентом поверхностного натяжения  $\sigma_0$ :

$$A_0 = \frac{\sigma_0}{H_0} \quad (5)$$

В нашей работе  $\sigma_0$  – коэффициент поверхностного натяжения воды при комнатной температуре  $T_0$ , который можно найти по таблицам. Определив таким образом постоянную прибора, можно перейти к определению коэффициента поверхностного натяжения при любой температуре, который теперь выразится формулой:

$$\sigma = A_0 H \quad (6)$$

## ЭКСПЕРИМЕНТ

### Задание 1. Определение постоянной прибора.

1. Налить в аспиратор воду. Открыть кран (9) и подобрать такую скорость истечения воды, чтобы пузырьки воздуха отрывались достаточно медленно, и можно было легко отсчитать высоты уровней в манометре. Записать температуру опыта.
2. Измерить 10 раз  $H_0$ , то есть разность высот верхнего уровня жидкости в манометре и нижнего уровня жидкости в нем. Найти его среднее значение  $\langle H_0 \rangle$ .
3. Вычислить постоянную прибора  $A_0 = \frac{\sigma_0}{H_0}$ .
4. Рассчитать погрешности измерений, учитывая случайную и инструментальную ошибки. Представить результат в табл. 1.

Таблица 1.

№	$H_0$ , м	$\langle H_0 \rangle$ , м	$A_0$ , н/м <sup>2</sup>

### Задание 2. Определение температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения воды.

1. Поднять стакан (6) с подставки (7) и, повернув ее, подставить на электроплитку. Включить плитку. Повернуть подставку и подставить стакан на нее.

2. Помешивая воду в стакане, выждать время установления теплового равновесия при температуре  $T_1$ . Измерить 10 раз  $H_1$ , найти ее среднее значение  $\langle H_1 \rangle$ . Результаты записать в табл. 2.
3. Вычислить коэффициент поверхностного натяжения при  $T_1$  по формуле (6).
4. Провести аналогичные измерения в 6 – 7 опытах, повышая каждый раз температуру на  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  и записывая результаты в таблицу.

Таблица 2.

№	$H_1$ , м	$\langle H_1 \rangle$ , м	$H_2$ , м	$\langle H_2 \rangle$ , м	$\sigma$ , н/м	$\langle \sigma \rangle$ , н/м

Задание 3. Построение графика зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры.

На миллиметровой бумаге начертить график  $\sigma = f(T)$ , откладывая по оси ординат коэффициент поверхностного натяжения, по оси абсцисс – температуру. Сделать выводы.

#### ЛИТЕРАТУРА

4. Кикоин А.К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – М.: Наука, 1976. – 480 с.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики / Д.В. Сивухин. – М.: Изд-во МФТИ, 2003. – Т.2: Термодинамика и молекулярная физика. – 576 с.
6. Телесин Р.В. Молекулярная физика / Р.В. Телесин. – М.: Высш.шк., 1973. – 360 с.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Термодинамика поверхностного натяжения.
2. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры.
3. Метод Кантора – Ребиндера: основа метода, его точность.