



Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

**Физический факультет**

*Кафедра общей физики*

Общий Физический практикум для школьников  
(молекулярная физика)

**Лабораторная работа 204 шк**

**ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО  
НАТЯЖЕНИЯ**

**Москва 2017**

### **Изучение явления поверхностного натяжения.**

Лабораторная работа 204 шк (практикум «Молекулярная физика и термодинамика» для школьников). Учебное пособие / Составители: Киров С.А., Салецкий А.М., Русакова Н.Е., Ананьева Н.Г., – М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2017, 13 с.

Атомы поверхностного слоя твердых тел и жидкостей находятся в принципиально другом положении, чем внутри тех же веществ. Наиболее ярко особенность границы раздела тел (или фаз) проявляется в жидкостях – это явление поверхностного натяжения. Отдельные капли воды стремятся принять форму близкую к шарообразной (и в невесомости так оно и есть), многие насекомые могут скользить по поверхности воды. Вода может выступать в качестве клея: мокрый песок лепится, а сухой рассыпается; кисточка в стакане воды расправляется (и промывается от водорастворимых красок), а, если вытащить кисточку из воды, ее ворс «склеится».

Существует довольно много способов измерения силы поверхностного натяжения. В данной задаче надо измерить коэффициент поверхностного натяжения воды методом счета капель и методом Дю Нуи (отрыва кольца).

Пособие предназначено для школьников и школьных учителей. Излагаемый материал может быть использован для подготовки к выполнению задач общего физического практикума для студентов первого курса физического факультета МГУ.

*Цель работы: измерение коэффициента поверхностного натяжения воды, в том числе в зависимости от температуры.*

## Введение

Под **агрегатными состояниями** понимают твердое, жидкое и газообразное состояние вещества. **Фазой** вещества называется его макроскопическая однородная часть, отделенная от других частей **границей раздела**. Фазами могут быть разные агрегатные состояния, но и в одном агрегатном состоянии могут быть разные фазы, например, в твердом теле области с разными кристаллическими структурами.

Молекулы (и атомы) взаимодействуют друг с другом. На больших расстояниях частицы не взаимодействуют. При сближении молекул возникают силы притяжения (максимальная сила притяжения на расстоянии 2–3 диаметров молекулы). Если бы сил притяжения между молекулами не было, не существовали бы жидкости и твердые тела. При уменьшении расстояния между молекулами возникают силы отталкивания. Иначе бы все тела сжались в одну точку. Равновесное положение атомов определяется из условия равенства сил притяжения и отталкивания. Из приведенных выше логических рассуждений, следует, что характер зависимости силы взаимодействия между молекулами от расстояния между ними должен быть примерно таким, как это показано на рис. 1.

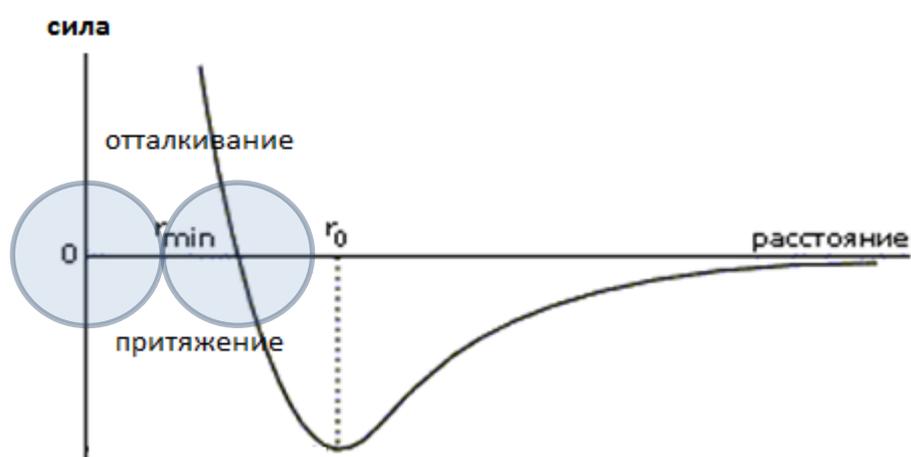


Рис 1. График зависимости силы взаимодействия между молекулами в зависимости от расстояния между ними.

В газах молекулы находятся в среднем на расстояниях, намного превышающих размеры молекул — они «не чувствуют» друг друга. Поэтому газы легко меняют объем и сжимаются. В жидкостях и твердых телах атомы и молекулы расположены вплотную друг к другу. Об этом свидетельствует малая сжимаемость жидкостей и твердых тел. На границах раздела разных фаз атомы находятся в специфическом состоянии: по разные стороны границы раздела расстояния до атомов различны и различны силы взаимодействия. Поверхность раздела разных сред или разных фаз одного вещества представ-

ляет собой слой толщиной порядка радиуса межмолекулярного взаимодействия (единицы нанометра), в котором молекулы взаимодействуют не только с молекулами своей фазы, но и с близлежащими молекулами соседней среды/фазы.

Рассмотрим случай границы достаточно разреженного газа с жидкостью. В простейшем варианте можно пренебречь влиянием молекул газа и рассматривать только молекулярные взаимодействия в жидкости.

Молекулы внутри жидкости окружены со всех сторон такими же молекулами, поэтому силы притяжения со стороны соседей скомпенсированы – молекула находится в равновесии. Молекулы, расположенные в поверхностном слое имеют соседей лишь с трех сторон. Поэтому силы притяжения со стороны соседей не скомпенсированы, и на молекулы поверхностного слоя будут действовать силы, направленные внутрь жидкости. Из-за этого молекулы стремятся перейти вглубь жидкости, поверхность жидкости при этом стремится уменьшиться. Но в стационарном состоянии все силы должны быть скомпенсированы. Это возможно, когда концентрация молекул уменьшается с приближением к поверхности, т.е. поверхностный слой растянут (см. приложение 1). Это приводит к тому, что энергия молекул в поверхностном слое отлична от их энергии внутри тела. Разность между энергией всех молекул вблизи поверхности раздела и той энергией, которую эти молекулы имели бы, если бы они находились внутри тела, называют *поверхностной энергией*.

**Поверхностная энергия** (или *свободная поверхностная энергия*) – это избыток энергии поверхностного слоя на границе раздела сред/фаз, по сравнению с энергией вещества внутри тела, обусловленный различием межмолекулярных взаимодействий в обоих средах/фазах.

Поверхностная энергия  $E_{\text{пов}}$  пропорциональна площади  $S$  поверхности раздела:  $E_{\text{пов}} = \sigma S$ . Коэффициент  $\sigma$  (греческая буква «сигма») называют **коэффициентом поверхностного натяжения**. Он зависит от природы соприкасающихся сред и от их состояния. Размерность коэффициента  $1 \text{ Н/м}$  или  $1 \text{ Дж/м}^2$ . Таким образом, **коэффициент поверхностного натяжения**  $\sigma$  – это свободная энергия единицы площади поверхности.

Любая система стремится к минимуму потенциальной энергии. Поскольку поверхностная энергия зависит от площади поверхности, то поверхность раздела двух сред всегда стремится уменьшиться. Именно с этим связано стремление капелек жидкости (или пузырьков газа) принять сферическую форму: при заданном объеме шар обладает наименьшей из всех фигур поверхностью. Этому стремлению противодействует влияние сил тяжести, но для маленьких капелек это влияние слабо и их форма близка к сферической. Исключить действие силы тяжести возможно в условиях невесомости, и опыты действительно подтвердили, что жидкость, вылитая из сосуда внутри космической станции стремится принять форму шара. Ранее это подтвердил физик Плато, он использовал капли анилина в соленом

растворе с той же плотностью, скомпенсировав действие силы тяжести силой Архимеда.

Для решения задач бывает удобно оперировать не энергией, а силой поверхностного натяжения.

Силы поверхностного натяжения стремятся стянуть поверхность (таким образом уменьшив ее площадь), значит должны быть направлены вдоль поверхности – по касательной к поверхности в данной точке.

Чтобы увеличить поверхность при постоянных температуре и объеме, требуется совершить работу, потому что для образования новой поверхности некоторые частицы из объема должны перейти на поверхность. А это связано с отрицательной работой против сил молекулярного притяжения.

Величина работы  $A$  пропорциональна изменению площади поверхности жидкости  $dS$  :

$$A = \sigma dS \quad (1)$$

Если участок края поверхности раздела фаз длиной  $l$  переместить перпендикулярно краю на  $dx$ , то площадь изменится на  $dS = l dx$ , свободная энергия – на  $dE = \sigma l dx$ , а силы поверхностного натяжения  $F$  совершат работу  $dA = -F dx$ .

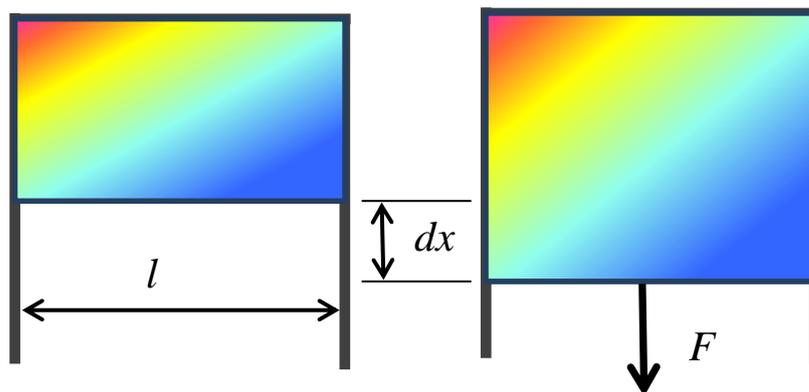


Рис. 2. Иллюстрация расчета работы при растяжении мыльной пленки на рамке: так как у пленки две поверхности, работа по растяжению пленки  $A = 2\sigma dS$ . Эта работа равна приращению поверхностной энергии  $dE = 2\sigma l dx$ .

Приравнявая изменение энергии работе, получаем для модуля этой силы

$$F = \sigma l \quad (2)$$

Эта сила направлена по касательной к поверхности контакта, перпендикулярно линии (реальной или мысленной), ограничивающей поверхность раздела фаз.

Поверхность жидкости может одновременно контактировать с различными веществами (фазами): газом, другой жидкостью или твердым телом. Кроме внутренних сил взаимодействия между частицами, из-за которых возникают силы поверхностного натяжения, на жидкость обычно действуют еще и внешние силы: сила тяжести и силы взаимодействия частиц жидкости с ча-

стицами твердых стенок сосуда, в котором она содержится. Поэтому действительная форма, которую принимает жидкость, определяется соотношением всех сил, которые действуют на жидкость.

Если среда, с которой контактирует жидкость – другая жидкость или твердое тело, то вводится понятие **смачивания**. Если силы притяжения молекул жидкости между собой меньше, чем силы притяжения между молекулами этой жидкости и второй среды, то говорят, что жидкость смачивает эту среду: жидкость стремится растечься по твердому телу или по жидкости. Например, капля керосина растекается по воде.

Если силы притяжения между молекулами жидкости и молекулам твердого тела меньше, чем между молекулами жидкости, жидкость стремится собраться в каплю: смачивания не происходит (слабое смачивание). Например, капли росы на листьях.

Вода смачивает (хорошо смачивает) стекло и не смачивает (плохо смачивает), например, парафин. Ртуть смачивает цинк и не смачивает стекло, дерево, кожу. Почва, древесина и кора, обезжиренные волокна льна, пеньки, шерсти и т. п. смачиваются водой. Жиры и смолы смачиваются водными растворами щелочей и т. п.

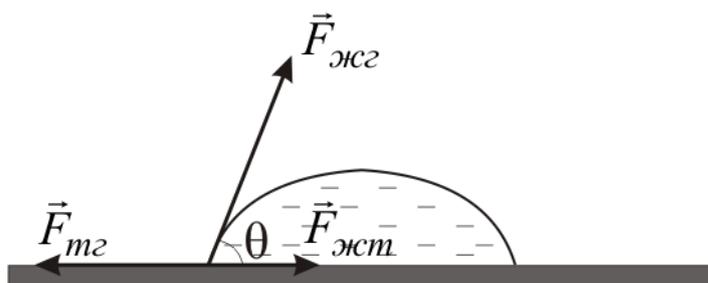


Рис. 3. Капля жидкости на поверхности твердого тела

Рассмотрим каплю жидкости на поверхности твердого тела. Имеются три границы раздела фаз: твердое тело–жидкость, твердое тело–газ, жидкость–газ (см. рис. 3). Линия пересечения всех трех поверхностей раздела называется **линией смачивания**. Измеренный внутри жидкости угол между

поверхностью жидкости и поверхностью твердого тела  $\theta$  (см. рис. 3) называют **краевым углом смачивания**. Его величина зависит от сил взаимодействия между молекулами соприкасающихся сред. На рис. 3 показаны вектора сил, действующих на линию разрыва поверхности. Здесь  $\vec{F}_{mg}$ ,  $\vec{F}_{жт}$  и  $\vec{F}_{жг}$  – силы, действующие на линию разрыва по касательной к поверхностям раздела фаз твердое тело–газ, жидкость–твердое тело и жидкость–газ соответственно. При динамическом равновесии (капля не растекается и не скатывается) равнодействующая этих трех сил должна быть равна нулю, или, рассматривая проекции сил, можно записать:

$$F_{жг} + F_{жг} \cos\theta - F_{mg} = 0 \quad (3)$$

или:

$$\sigma_{mg} = \sigma_{жт} + \sigma_{жг} \cdot \cos\theta \quad (4)$$

Уравнение (4) называется **уравнением Юнга**.

В зависимости от значения равновесного угла  $\theta$  различают несколько типов смачивания:

- 1)  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  ( $\sigma_{тг} > \sigma_{жст}$ ) – **ограниченное смачивание** поверхности твердого тела жидкостью (как в случае, изображенном на Рис. 3, жидкость растекается по поверхности твердого тела до наступления динамического равновесия сил);
- 2) если  $\sigma_{тг} > \sigma_{жст} + \sigma_{жг}$ , то равновесие капли невозможно, краевой угол не устанавливается ( $\theta \approx 0$ ) и жидкость растекается по поверхности твердого тела, покрывая ее тонкой пленкой, это явление называется **полным смачиванием (растеканием)**;
- 3) при  $90^\circ < \theta < 180^\circ$  ( $\sigma_{тг} < \sigma_{жст}$ ) говорят, что жидкость не смачивает поверхность твердого тела (**несмачивание**, «плохое смачивание»);
- 4)  $\theta \approx 180^\circ$  – полное несмачивание: контакт жидкости и твердого тела при отсутствии иных сил стягивается в точку, а жидкость приобретает форму шара.

### ***Коэффициент поверхностного натяжения зависит:***

- от плотности веществ, которые контактируют. Для жидкости чем выше плотность второго вещества, тем меньше коэффициент. Так, на границе двух жидкостей коэффициент поверхностного натяжения всегда меньше, чем на границе жидкость–разреженный газ (границу жидкость–разреженный газ часто называют **свободной поверхностью**). Например, на свободной поверхности ртути коэффициент поверхностного натяжения равен 0,465 Н/м, на поверхности раздела ртути с водой – 0,427 Н/м, а со спиртом – 0,399 Н/м (при комнатной температуре).

- от количества примесей, содержащихся в жидкости. Растворенные в жидкости вещества способны как понижать, так и повышать поверхностное натяжение. Растворенные вещества, понижающие поверхностное натяжение жидкости, называют **поверхностно-активными веществами (ПАВ)**. Они уменьшают энергию поверхностного слоя. Примерами ПАВ в быту могут служить мыло и стиральные порошки.

- от температуры. При увеличении температуры молекулы жидкости начинают двигаться быстрее, и, следовательно, молекулы легче преодолевают силы притяжения, это и приводит к уменьшению сил поверхностного натяжения. При повышении температуры коэффициент поверхностного натяжения линейно уменьшается. Значит, для каждого вещества существует температура (**критическая температура**), при которой  $\sigma = 0$ . Выше этой температуры вещество не может быть в жидком состоянии (плотность жидкости и насыщенного пара при критической температуре равны – нет различия между жидкостью и паром).

### ***Методы измерения поверхностного натяжения***

Способы определения поверхностного натяжения делятся на статические и динамические. В статических методах поверхностное натяжение определяется у сформировавшейся поверхности, находящейся в равновесии. Например, капиллярный метод (определяется высота поднятия жидкости в капилляре), метод лежащей капли и др. Динамические методы связаны с разрывом поверхностного слоя. В данной задаче используются динамические методы: метод счета капель и вариант метода Дю Нуи (du Noüy) [2], состоящий в измерении силы отрыва горизонтально подвешенного тонкого металлического кольца от поверхности жидкости.

### Упражнение 1. Метод счета капель.

Метод счета капель или сталагмометрический метод (сталагма - капля) считается самым простым способом измерения поверхностного натяжения с технической точки зрения. Из тонкой стеклянной (или металлической) трубки исследуемая жидкость вытекает каплями. При выходе из трубки размер капли постепенно нарастает, но отрывается капля только достигнув определенного размера. Это происходит потому, что пока капля невелика, силы поверхностного натяжения ( $F = \sigma l$ ) достаточны для того, чтобы противостоять силе тяжести ( $F = mg$ ) и предотвратить отрыв. Отрыв же произойдет тогда, когда вес капли станет равным силе поверхностного натяжения, удерживающей ее.

$F = \sigma l = \sigma \pi d$ ,  $l$  – длина окружности шейки капли;  $d$  – диаметр шейки капли, равный внутреннему диаметру конца трубки. Если  $m_0$  – масса одной оторвавшейся капли жидкости, то

$$\sigma = \frac{m_0 g}{\pi d} \quad (5)$$

Но метод не очень точен, потому что процесс отрыва капли весьма сложен: капля вытягивается, образуется шейка и в действительности отрывается капля меньшего размера

(рис. 4), чем это предсказывает наша простейшая теория. Поэтому в методе счета капель используют поправки, зависящие от диаметра трубки и объема оторвавшейся капли.

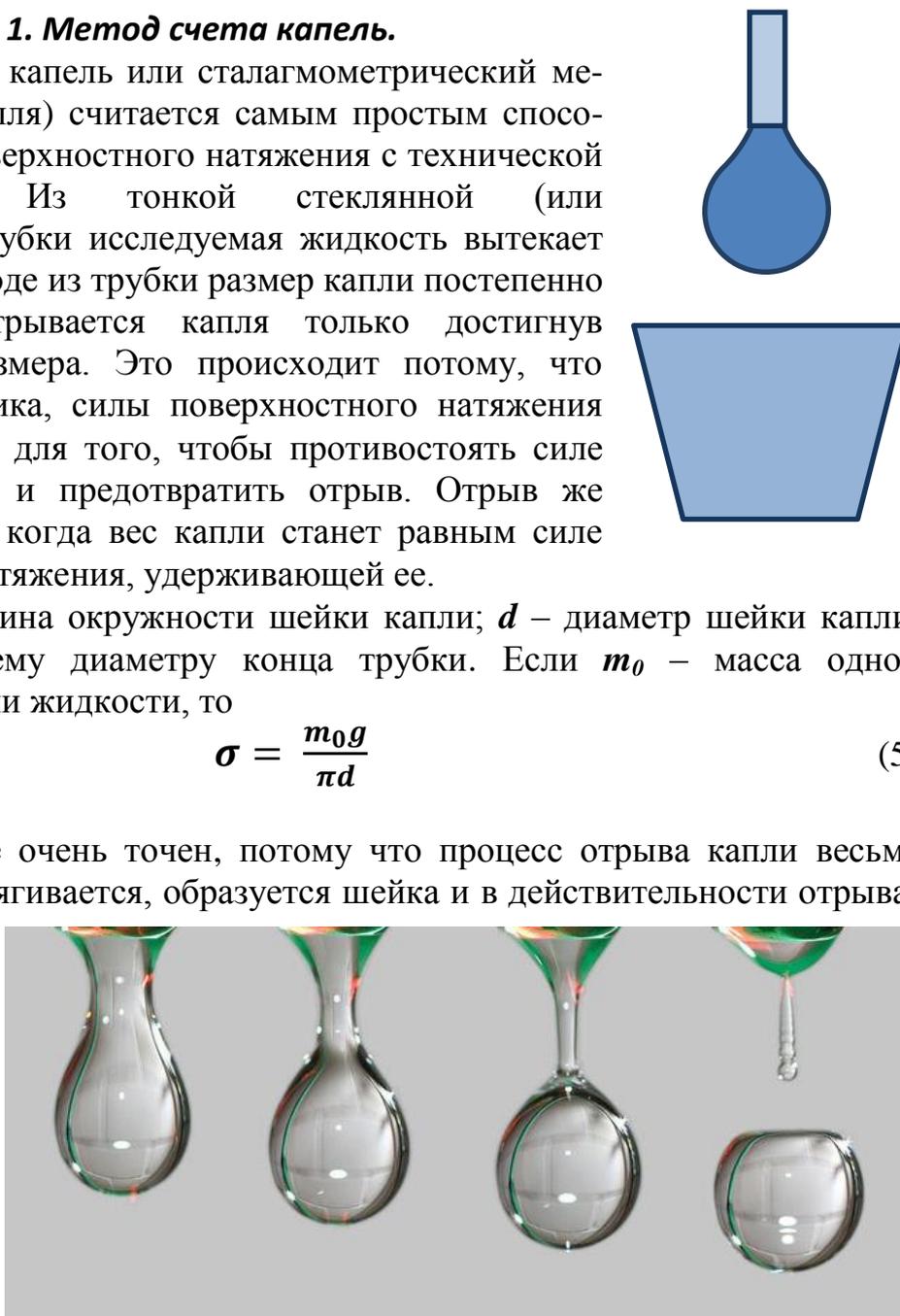


Рис.4. Пример отрыва капли.

<http://www.bolshoyvopros.ru/questions/1941151-skolko-vesit-obychnaja-kaplja-vody.html>

В данной, учебной задаче поправки учитываться не будут, но результат получится с некоторой систематической погрешностью.

### Эксперимент

В данном методе продолжительность образования капли должна быть не менее 5 – 10 с. На практике допускается быстрое увеличение капли до объема 70 – 90 % от предельного объема, но дальнейший рост объема капли необходимо проводить медленно.

1. Взвесить пластиковый стакан, в который будут собираться капли. Записать в первую строку таблицы 1 («0» капель).

2. Накапать пипеткой 50 капель в стакан порциями по 10 капель. Каждую порцию воды (10, 20, 30... капель) необходимо взвесить. Результаты занести в таблицу 1.  $N$  – количество капель,  $M$  – масса стакана с водой,  $m$  – масса воды в стакане.

Таблица 1.

Определение массы капли воды

N	$M, г$	$m, г$
0		0
10		
20		
30		
40		
50		

### Обработка результатов

1. Построить график зависимости массы воды в стакане от количества капель. По углу наклона графика определить массу одной капли (желательно МНК), оценить погрешность массы одной капли (абсолютную  $s_m$  и относительную  $\varepsilon_m = s_m / m$ ).

2. По формуле (5) рассчитать коэффициент поверхностного натяжения. Диаметр пипетки  $d = 3,0 \pm 0,3$  мм.

Оценить относительную (и абсолютную) погрешность расчёта коэффициента поверхностного натяжения

$$\varepsilon_\sigma = \sqrt{\varepsilon_m^2 + \varepsilon_d^2}$$

3. Объяснить, как скажется на результате заниженное значение массы капли воды.

### Упражнение 2. Метод отрыва кольца Дю Нуи.

Необходимо измерить силу отрыва горизонтально подвешенного тонкого металлического кольца от поверхности жидкости. Зная силу отрыва,

можно рассчитать по формуле (2)  $F = \sigma l$  коэффициент поверхностного натяжения.  $l$  – длина линии смачивания (окружности кольца).

Вместо кольца в данной задаче использована цилиндрическая оболочка из дюрала (сплав алюминия с Cu, Mg и Mn ) толщины  $a = 0,2$  мм.

Отметим, что формула (2) используется для случая полного смачивания. В остальных случаях нужно вводить безразмерный поправочный коэффициент  $k$ , зависящий от материала кольца. В нашем случае полную силу со стороны жидкости в момент отрыва кольца можно представить в виде

$$F = k2\sigma 2\pi R = 2k\sigma\pi D \quad (6)$$

где  $D$  – диаметр кольца. Коэффициент 2 появляется потому, что надо учесть и внутреннюю и внешнюю поверхность кольца.

Общий вид установки показан на рис.5. Измерительное кольцо 1 подвешено на тонких нитях к динамометру 2 с ценой деления 1 мН. Стекланный сосуд из термостойкого стекла 3 с водой установлен на подвижной подставке 4, обеспечивающей плавное перемещение по высоте вращением ручки 5. На подставке закреплен держатель для термопары 6, нижний конец которой должен быть погружен в верхний слой жидкости. Температура измеряется в градусах Цельсия подключенным к термопаре мультиметром 7.

Сначала сосуд с жидкостью поднимается подвижной подставкой до контакта кольца с жидкостью, а затем медленно опускается. Разность показаний динамометра в момент отрыва кольца и исходного веса кольца используется для расчета коэффициента поверхностного натяжения по формуле (6). Данный метод позволяет проводить измерения при разных температурах жидкости.

## **Эксперимент**

### **Подготовка к измерениям**

Перед началом измерений нужно убедиться в горизонтальности подвешенного кольца. В случае заметных отклонений от горизонтали обратиться к сотрудиникам практикума для юстировки.

**Для получения стабильных результатов и максимального смачивания, кольца обезжирены, поэтому к ним нельзя прикасаться руками.**

Спай термопары должен быть погружен в жидкость на минимальную глубину, поскольку измерения поверхностного натяжения проводятся на поверхностном слое жидкости, а температура в жидкости может зависеть от глубины. Правильное погружение термопары обеспечивается наливом воды до нужного уровня или регулировкой ее держателя (последнее нежелательно). Термопара не должна мешать перемещению кольца относительно подставки при ее подъеме. Установка уже отрегулирована и работа с ней сводится только к подъему и опусканию площадки путем вращения ручки 5.

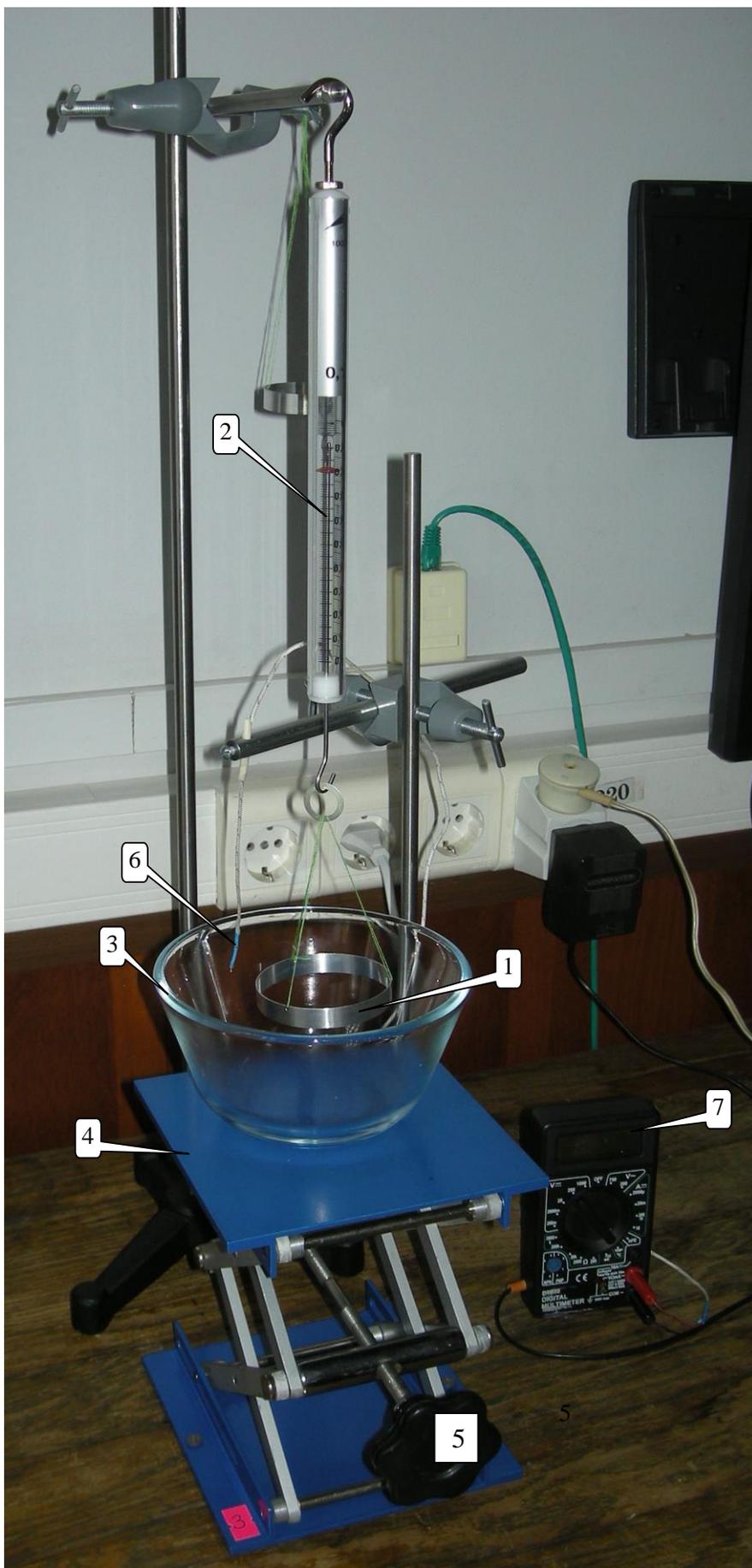


Рис.5.  
Установка для  
измерения  
поверхностного  
натяжения методом  
отрыва кольца

## Измерения

1. Сотрудник практикума нальет в сосуд холодную воду, для которой надо провести первые измерения.

**Кольцо погружать в жидкость на глубину не более 1/3 его высоты, не допуская намокания нитей подвеса.** Опускать кольцо в воду надо очень аккуратно: при касании поверхности воды кольцо втягивается в воду за счет поверхностного натяжения.

После отрыва кольца от жидкости надо подождать окончания колебаний кольца на пружине динамометра.

**Нельзя пытаться остановить колебания кольца руками или какими-то предметами. Это неминуемо приведет к перекосу кольца и необходимости новой юстировки.**

Провести эксперимент с холодной водой 3 раза.

Зафиксируйте температуру до подъема кольца, поднимите кольцо, зафиксируйте силу отрыва, еще раз зафиксируйте температуру. Будем считать, что отрыв кольца прошел при средней арифметической температуре из двух зафиксированных значений.

Все измерения записать в таблицу 2.

Таблица 2.

Определение силы отрыва кольца  $F$  и коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  от температуры. Сила тяжести кольца  $F_0 = \dots$

N	$t_{\text{до отрыва}},$ $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{после отрыва}},$ $^{\circ}\text{C}$	$\langle t \rangle, ^{\circ}\text{C}$	$F_1, \text{ мН}$	$F, \text{ мН}$	$\sigma, \text{ мН/м}$	$S_{\sigma},$ $\text{ мН/м}$
<i>Холодная вода</i>							
1							
2							
3							
<i>Горячая вода</i>							
4							
...							

2. Затем нужно опустить сосуд ниже уровня кольца, снять его с подставки, вылить воду, снова установить на подставку и поднять подставку на рабочую высоту. После этого сотрудник практикума нальет в сосуд до нужного уровня предварительно нагретую воду. Ввиду того, что вода быстро остывает, нужно сразу выполнить три измерения при максимально высокой температуре ( $80 - 90 ^{\circ}\text{C}$ ). При погружении кольца нужно немного подождать (около 20 секунд) для установления теплового равновесия кольца с жидкостью.

3. Последующие измерения провести при последовательном снижении температуры до  $60^{\circ}\text{C}$  и  $50^{\circ}\text{C}$ . Поскольку остывание воды происходит медленно и между измерениями получаются интервалы до 30 минут, в эти промежутки можно выполнить расчеты для уже снятых измерений.

### Обработка результатов

- 1) Найти силу поверхностного натяжения  $F$  как разность сил отрыва кольца  $F_1$  и веса кольца  $F_0$ . Рассчитать коэффициент поверхностного натяжения по формуле (5). В данной установке диаметр кольца  $D = 61 \pm 1$  мм,  $k = 0.911$ .
- 2) Оценить погрешность  $F$  с учетом погрешности динамометра  $\pm 0.5$  мН.
- 3) Оценить погрешность  $\sigma$
- 4) Построить график зависимости  $\sigma(T)$ , Погрешность измерения температуры  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

### Приложение 1.

В стационарном состоянии все силы должны быть скомпенсированы: молекулы не должны «тонуть». Это возможно, когда концентрация молекул уменьшается с приближением к поверхности, т.е. поверхностный слой растянут.

Рассмотрим равновесие молекулы, находящейся во втором слое от поверхности жидкости (рис.2). Силы, действующие на молекулу в горизонтальном направлении, скомпенсированы, их можно не учитывать. Поскольку силы отталкивания близкодействующие, силы отталкивания учтем только от двух молекул ближайших рядов 1 и 3 – это  $F_1$  и  $F_3$  (показаны двойными стрелками).

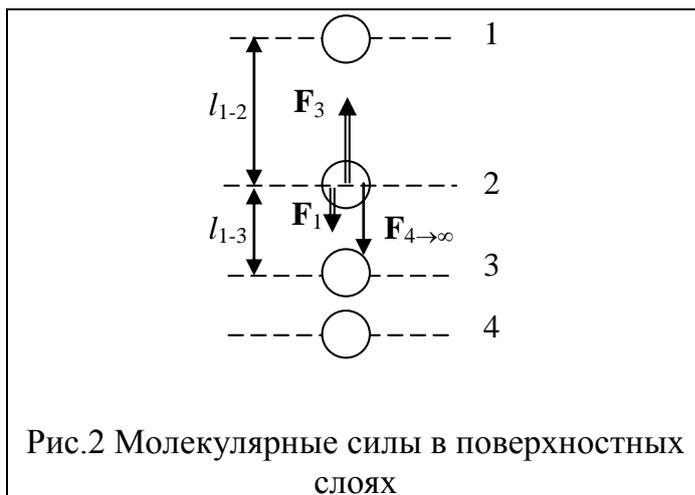


Рис.2 Молекулярные силы в поверхностных слоях

Молекулы остальных рядов от 4 и далее из-за своей удаленности от молекулы 2 вызовут только силы притяжения с равнодействующей  $F_4$ , направленной вглубь от поверхности (одинарная стрелка). Очевидно, что при одинаковом расстоянии между рядами 1-2 и 2-3 ( $l_{12} = l_{23}$ ) равновесие невозможно, т.к. силы отталкивания  $F_1$  и  $F_3$  при этом были бы равны, и осталась бы не скомпенсированная сила  $F_4$ . Увеличение расстояния  $l_{12}$  вызывает быстрое уменьшение силы отталкивания  $F_1$  и при определенном соотношении  $l_{12} > l_{23}$  все силы компенсируются  $F_1 + F_3 + F_4 = 0$ .

То же относится и к остальным рядам. Таким образом, расстояние между рядами молекул возрастает с приближением к поверхности, то есть поверхностный слой растянут.