

Лабораторная работа № 1-09

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ ОТРЫВА

1. Цель работы.

Определение коэффициента поверхностного натяжения воды и водных растворов глицерина методом отрыва кольца.

2. Теоретическое введение.

2.1. Природа сил поверхностного натяжения.

Поверхность жидкости, соприкасающейся с другой средой, например с ее собственным паром, с другой жидкостью или с твердым телом (в частности со стенками сосуда, в котором она содержится), находится в особых условиях по сравнению с остальной массой жидкости.

Молекула в глубине жидкости испытывает притяжение со стороны окружающих ее молекул, которые находятся внутри некоторой сферы с центром в данной молекуле, называемой сферой молекулярного действия. Радиус такой сферы равен нескольким эффективным диаметрам молекулы (рис. 1). Равнодействующая сил притяжения равна нулю. Молекулы в пограничном слое окружены молекулами той же жидкости не со всех сторон. В сферу молекулярного действия попадают и молекулы среды, с которой жидкость граничит. Поэтому равнодействующая сила, действующая на молекулу в пограничном слое, направлена либо в сторону объема жидкости, либо в сторону объема граничащей с ней среды. В случае, когда жидкость граничит со своим собственным паром (насыщенным), т.е. в случае, когда мы имеем дело с одним веществом, сила, испытываемая молекулами поверхностного слоя, направлена внутрь жидкости. Это объясняется тем, что вдали от критической температуры концентрация молекул в жидкости много больше, чем в насыщенном паре (рис. 1), поэтому сила притяжения, испытываемая молекулами поверхностного слоя со стороны молекул жидкости, много больше, чем со стороны молекул пара.

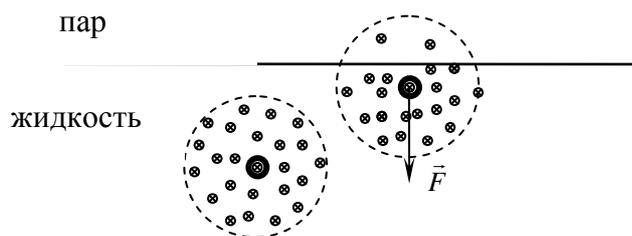


Рис. 1. На молекулу в глубине жидкости действует результирующая сила, равная нулю. На молекулу в поверхностном слое действует сила, направленная в глубь жидкости.

При переходе молекулы из глубины жидкости в поверхностный слой действующие на нее в поверхностном слое силы совершают над молекулой отрицательную работу. В результате кинетическая энергия молекулы уменьшается, а потенциальная увеличивается. Поверхностный слой в целом обладает дополнительной энергией, которая входит составной частью во внутреннюю энергию жидкости. Поскольку энергия U_s поверхностного слоя должна быть пропорциональна площади поверхности, то изменение площади поверхности dS повлечет за собой изменение потенциальной энергии:

$$dU_s = \alpha \cdot dS .$$

Коэффициент α является основной величиной, характеризующей поверхностные свойства жидкости, и называется **коэффициентом поверхностного натяжения** ($\alpha > 0$). Следовательно, коэффициент поверхностного натяжения представляет собой дополнительную потенциальную энергию, которой обладает единица площади поверхностного слоя.

Поскольку система в положении равновесия занимает состояние, при котором ее потенциальная энергия минимальна, то жидкость обнаруживает стремление к сокращению своей поверхности. Поэтому должны существовать силы, стремящиеся сократить поверхность. Эти силы называются силами поверхностного натяжения. Они направлены вдоль поверхности жидкости по касательной к ней. Тогда коэффициент поверхностного натяжения α можно определить как силу, действующую на единицу

длины контура поверхности. Из вышесказанного следует, что в СИ α измеряется либо в Дж / м², либо в Н / м.

Ранее было сказано, что молекула в поверхностном слое взаимодействует не только с молекулами самой жидкости, но и с молекулами среды, с которой жидкость граничит. Поэтому понятие коэффициента поверхностного натяжения, которое введено выше, относится к случаю, когда жидкость граничит со своим собственным паром. С повышением температуры различие в плотностях жидкости и ее насыщенного пара уменьшается, в связи с этим уменьшается и коэффициент поверхностного натяжения.

Примеси сильно сказываются на величине поверхностного натяжения. Так растворение в воде мыла приводит к уменьшению коэффициента поверхностного натяжения, а добавление поваренной соли, приводит к увеличению α .

2.2. Условия на границе жидкости и твердого тела.

При соприкосновении жидкости и твердого тела, поверхностная энергия жидкости и форма, которую принимает поверхность, определяется соотношением действующих на жидкость сил: силы тяжести, силы взаимодействия молекул жидкости друг с другом и сил взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердого тела и с молекулами пара, с которыми жидкость граничит. Характеристикой сил взаимодействия молекул жидкости друг с другом и с молекулами граничащих с жидкостью сред служит *краевой угол θ* , т.е. *угол, отсчитываемый внутри жидкости и образованный касательными к поверхности жидкости и к поверхности твердого тела* (рис. 2). Если краевой угол $0 < \theta < \pi / 2$, то говорят, что жидкость *частично смачивает* поверхность твердого тела. При $\theta = 0$ имеет место *полное смачивание*. Если краевой угол $\pi / 2 < \theta < \pi$, то говорят о *частичном несмачивании* поверхности твердого тела жидкостью. При $\theta = \pi$ имеет место *полное несмачивание*.

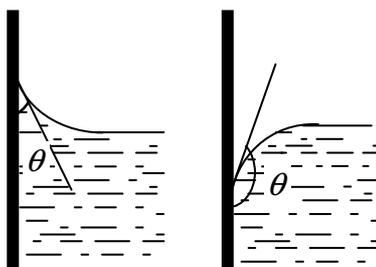


Рис. 2. К определению краевого угла: а) частичное смачивание поверхности твердого тела жидкостью, б) частичное несмачивание поверхности твердого тела жидкостью.

2.3. Теория метода.

Прикрепим к чувствительному динамометру с помощью нитей (рис. 3) тонкое кольцо. Опустим кольцо в сосуд с жидкостью и будем сосуд медленно опускать. Когда кольцо начнет приподниматься над поверхностью жидкости, вместе с ним начнет подниматься и обволакивающая кольцо пленка жидкости, а показание динамометра при этом постепенно увеличивается. Оно достигает максимального значения в момент разрыва пленки жидкости и отрыва кольца. Полагая смачивание полным, рассмотрим силы, действующие на кольцо и динамометр непосредственно перед отрывом пленки (рис. 3).

Силы тяжести $m\vec{g}$ и поверхностного натяжения \vec{F} , действующие на кольцо, уравновешены силами натяжения нитей \vec{T} . Проектируя указанные силы на ось Y , получим: $2T_y = mg + F$. При этом сила \vec{F}_0 , действующая на динамометр равна:

$$\vec{F}_0 = \vec{F} + m\vec{g} \quad (1)$$

Мы будем пренебрегать силой тяжести, действующей на массу жидкости, которая поднимается вместе с кольцом.

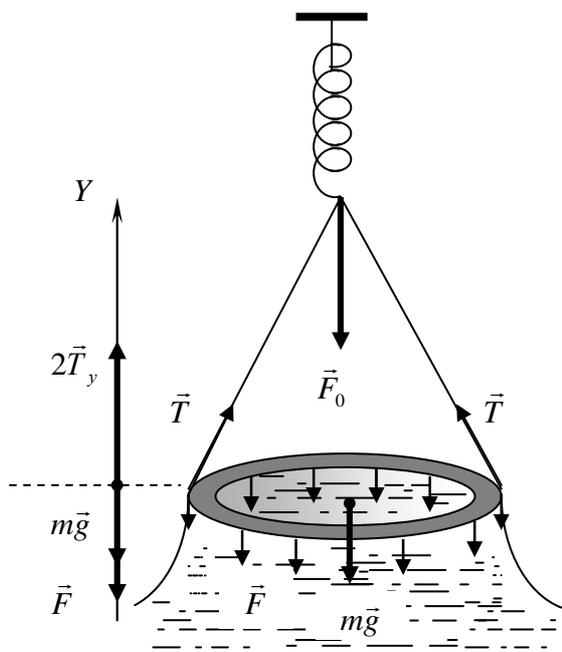


Рис. 3. Определение коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца. Указаны силы, действующие на кольцо в момент отрыва пленки жидкости: $m\vec{g}$ - сила тяжести (приложена к центру масс кольца), \vec{F} - сила поверхностного натяжения (действует по всему периметру кольца, как внешнему, так и внутреннему), \vec{T} - сила натяжения нити, \vec{F}_0 - результирующая сила, действующая на динамометр со стороны кольца.

В соответствии с определением коэффициента поверхностного натяжения, величину силы F можно представить в виде:

$$F = \alpha \cdot l \quad (2)$$

где l – длина контура поверхности, вдоль которой действует сила. В данном случае l равна длине внутренней и внешней окружности кольца, а если кольцо тонкое, можно считать, что его внешний d_1 и внутренний диаметр d_2 примерно равны, тогда:

$$F = \alpha(\pi d_1 + \pi d_2) \approx \alpha \cdot 2\pi \cdot d \quad (3)$$

где d – средний диаметр кольца ($d_1 \approx d_2 \approx d$).

Из уравнения (1) и формул (2) и (3) следует, что, зная разницу между показаниями динамометра в момент отрыва кольца и силой тяжести: $F = F_0 - mg$, можно получить выражение для определения коэффициента поверхностного натяжения:

$$\alpha = \frac{F}{2\pi \cdot d} \quad (4)$$

3. Описание экспериментальной установки.

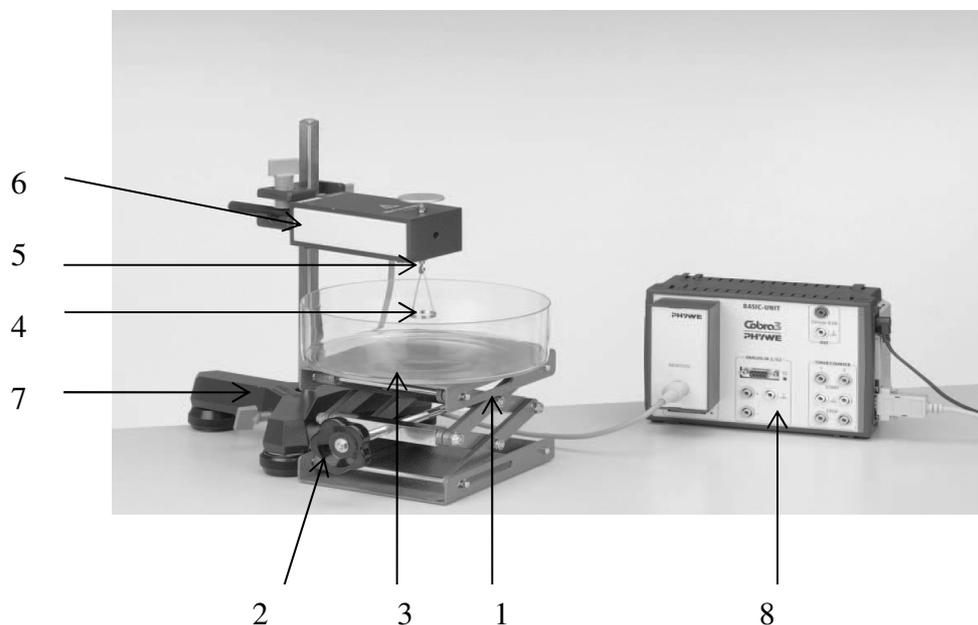


Рис.4. Общий вид экспериментальной установки: 1 – подвижная платформа, 2 – винт, 3 – чашка Петри, 4- кольцо, 5 – крючок, 6 – измерительный силовой блок «Ньютон», 7 – опора, 8 – блок «Cobra 3».

Установка состоит из подвижной платформы 1, которую можно поднимать и опускать, вращая винт 2. На платформу устанавливается чашка Петри 3 с исследуемой жидкостью. Кольцо 4 диаметром $d = 19,5 \pm 0,05$ мм подвешивается на крючок 5 измерительного модуля «Ньютон» 6, который укреплен на опоре 7. Сигнал с модуля 6 поступает на модуль «Cobra 3» 8, сопряженный с компьютером.

Таблица 1. Технические данные приборов.

№№ п/п	Название прибора	Пределы измерений	Число делений	Цена деления	Класс точности	Абсолютная приборная погрешность
1	Измерительный модуль «Ньютон».					

4. Порядок выполнения работы.

При выполнении работы следует строго соблюдать правила техники безопасности и охраны труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории. Выполнять работу нужно предельно аккуратно, не трясти и не толкать установку, поскольку это может исказить результаты. Работу следует проводить в строгом соответствии с нижеизложенным порядком выполнения и в объеме, предусмотренном индивидуальным заданием.

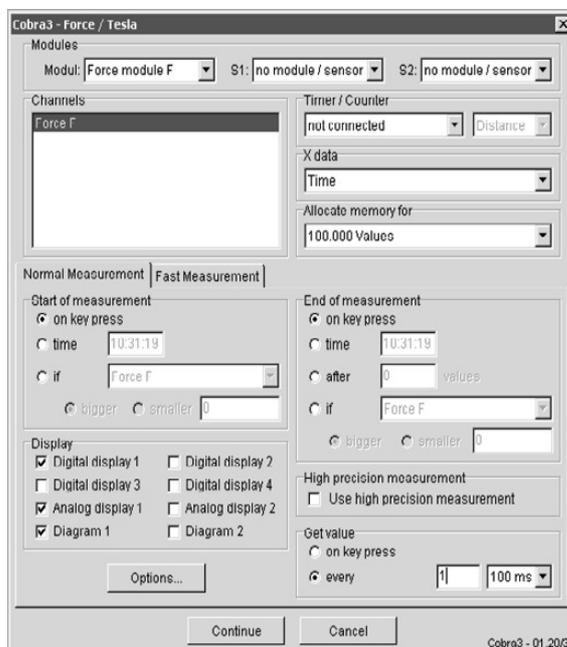


Рис. 5. Параметры измерений.

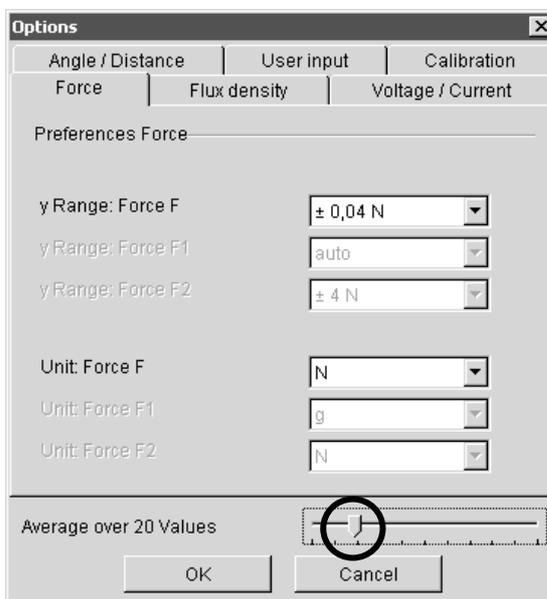


Рис.6. Параметры силы

Измерение силы, действующей на кольцо в момент отрыва от поверхности жидкости.

1. Вращая винт 2, опустите платформу 1.
2. Наполните чашку Петри примерно наполовину водой или раствором глицерина указанной в индивидуальном задании концентрации. Установите чашку на платформу 1.
3. Подвесьте на крючок 5 кольцо 4.
4. Медленно вращая винт 6, поднимите платформу так, чтобы кольцо касалось поверхности жидкости.
5. Запустите компьютерную программу трансляции данных и установите значения параметров, как указано на рис. 5.
6. Выберите в меню программы кнопку «Options» и задайте параметры, как указано на рис. 6. Число измерений, по которым производится усреднение («Average values»), задайте равным примерно 20, для этого передвиньте флажок (выделен на рис. 6) в соответствующее положение. Нажмите кнопку «OK».
7. Запустите компьютерную программу измерений, нажав кнопку «Continue», затем – «Start measurements».
8. Очень медленно опускайте платформу 1, вращая винт 2, пока кольцо не оторвется от поверхности жидкости.
9. Вновь медленно поднимите чашку до соприкосновения поверхности жидкости с кольцом и медленно опустите её. Повторите измерения 10 раз. Закончите измерения, нажав кнопку «Stop measurements».
10. На экране компьютера вы получите кривую зависимости силы, действующей на кольцо от времени. Типичный вид такой кривой представлен на рис. 7.

5. Обработка результатов измерений.

Определение коэффициента поверхностного натяжения.

Кривая зависимости силы, действующей на кольцо (рис. 7) позволяет найти разницу между весом кольца (точка *A* на рис. 7) и силой, действующей на кольцо в момент отрыва (точка *B* на рис. 7). По мере вытаскивания кольца из жидкости на него начинает действовать сила поверхностного натяжения, кроме того, вместе с кольцом поднимается и пленка жидкости, что несколько увеличивает действующую на кольцо силу тяжести, поэтому на участке *AB* сила растет. В точке *B* сила достигает максимума, затем резко уменьшается, что соответствует отрыву пленки жидкости. В точке *C* сила достигает значения равного силе тяжести, действующей на кольцо, но, поскольку кольцо совершает несколько коротких колебаний, то и сила испытывает осцилляции (участок *CDEF* на рис. 7.) Из-за случайных толчков установки пленка жидкости отрывается от кольца не сразу по всему периметру, а постепенно, хотя и достаточно быстро. Поэтому при многократном повторении опыта значения силы в момент отрыва кольца несколько различаются.

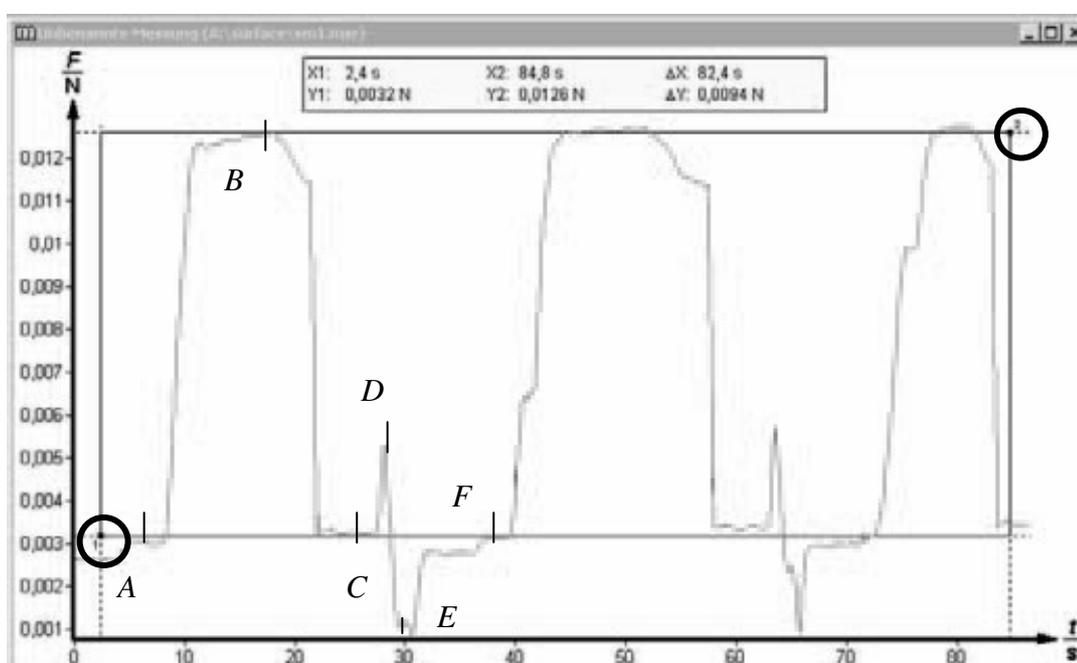


Рис. 7. Кривая зависимости силы, действующей на кольцо от времени.

Таблица 2. Условия проведения эксперимента.

Исследуемая жидкость	Диаметр кольца $d \pm \Delta d$, м	Температура

1. Заполните таблицу 2.
2. В верхней строке меню нажмите кнопку «решетка» (#). На графике появятся две горизонтальные и две вертикальные курсорные линии с выделенными точками 1 и 2 в перекрестьях (выделены на рис.7).
3. Подведите курсор к точке 1. Удерживая нажатой левую кнопку мыши, установите нижнюю курсорную линию посередине между точками, D и E (рис.7). Это значение примерно соответствует весу кольца.
4. Подведите курсор к точке 2, удерживая нажатой левую кнопку мыши, совместите верхнюю курсорную линию с точкой отрыва кольца (рис. 7) для первого измерения. Запишите в таблицу 3 значение $F = \Delta Y$, которое высвечивается на экране над графиком. ΔY - соответствует разности между максимальной силой, действующей на кольцо в момент отрыва, и силой тяжести.
5. Совмещая поочередно верхнюю курсорную линию с точкой отрыва кольца (рис. 7) для второго и последующих измерений, определите силу, действующую на кольцо в момент отрыва для каждого измерения. Каждый раз записывайте полученные значения в таблицу 3.
6. Найдите среднее значение силы отрыва \bar{F} по формуле

$$7. \quad \bar{F} = \frac{\sum_{i=1}^{10} F_i}{10}.$$

8. Найдите погрешности отдельных измерений $\Delta F_i = \bar{F} - F_i$ и запишите в таблицу 3.

9. Найдите среднюю квадратичную погрешность измерения σ_F по формуле:

$$10. \sigma_F = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} \frac{\Delta F_i^2}{10(10-1)}}$$

11. Найдите коэффициент поверхностного натяжения $\bar{\alpha}$ по формуле (4),

подставляя в нее среднее значение силы \bar{F} .

12. Найдите относительную погрешность метода по формуле:

$$13. \delta = \left(\frac{\Delta F}{\bar{F}} + \frac{\Delta r}{r} \right) \cdot 100\% .$$

14. Считайте, что полная погрешность измерения силы $\Delta F = \sigma_F$, поскольку приборная погрешность мала.

15. Найдите абсолютную погрешность определения α данным методом по формуле:

$$16. \Delta\alpha = \frac{\delta}{100\%} \cdot \bar{\alpha} .$$

17. Окончательный результат представьте в виде:

$$18. \alpha = \bar{\alpha} \pm \Delta\alpha .$$

Таблица 3. Результаты измерения силы отрыва.

№№ п/п	F_i , Н	ΔF_i , Н
1		
2		
.		
.		
.		
10		
Среднее значение \bar{F} , Н		ΔF , Н

6. Библиографический список

а) основная:

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики: в 5 кн., кн. 3. М.: АСТ: Астрель, 2007. С. 143 - 146, 149- 152.
2. *Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. (№ 805). М.: МИСиС. «Учеба». 2007.- 108 с.

б) дополнительная:

3. *Кикоин А.К. Кикоин И.К.* Молекулярная физика. М.: Лань. 2007. С.321-333, 340 - 343.

7. Контрольные вопросы.

4. Какова природа сил поверхностного натяжения?
5. Каков физический смысл коэффициента поверхностного натяжения? В каких единицах он измеряется?
6. От каких параметров зависит коэффициент поверхностного натяжения?
7. Что такое краевой угол смачивания?
8. Как можно вывести формулу для определения коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца?
9. Каковы источники случайных и систематических ошибок при определении коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца?

8. Индивидуальные задания.

Задание 1.

1. Объясните происхождение сил поверхностного натяжения. Дайте определение коэффициента поверхностного натяжения.
2. Проведите измерения силы поверхностного натяжения методом отрыва кольца для воды.
3. Рассчитайте коэффициент поверхностного натяжения для воды. Сравните результат с табличным значением. Укажите возможные причины расхождения табличного и экспериментального значений.

Задание 2.

1. Выведите формулу для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца.
2. Проведите измерения силы поверхностного натяжения методом отрыва кольца для 50% раствора глицерина.
3. Рассчитайте коэффициент поверхностного натяжения для указанного раствора. Сравните результат с табличным значением коэффициента поверхностного натяжения для воды и глицерина.

Задание 3.

1. Объясните принцип измерения коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца. Укажите основные причины ошибок при измерении коэффициента поверхностного натяжения данным методом.
2. Проведите измерения силы поверхностного натяжения методом отрыва кольца для 30% раствора глицерина.
3. Рассчитайте коэффициент поверхностного натяжения для указанного раствора. Сравните результат с табличным значением коэффициента поверхностного натяжения для воды и глицерина.

Задание 4.

1. Объясните возникновение явлений смачивания и несмачивания поверхности твердых тел жидкостью. Дайте определение краевого угла смачивания.
2. Проведите измерения силы поверхностного натяжения методом отрыва кольца для 70% раствора глицерина.
3. Рассчитайте коэффициент поверхностного натяжения для указанного раствора. Сравните результат с табличным значением коэффициента поверхностного натяжения для воды и глицерина.