

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М. В. Ломоносов

**Физический факультет
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния**

**Методическая разработка
по общему физическому практикуму**

Лаб. работа № 38

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ
КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО
НАТЯЖЕНИЯ РАСТВОРА ОТ ЕГО
КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТОДОМ ОТРЫВА**

Описание составил доцент Авксентьев Ю.И.

Москва - 2018

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

Цель работы — определение коэффициента поверхностного натяжения раствора при различных концентрациях компонент.

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностная энергия

Слой жидкости вблизи ее поверхности, соприкасающийся с другой средой, например с ее собственным паром, с другой жидкостью или с твердым телом, находится в особых условиях по сравнению с остальной массой жидкости. Сравним поведение молекул этого слоя на границе с паром и молекул внутренних областей жидкости.

Молекула, находящаяся в глубине жидкости, подвергается действию окружающих её со всех сторон молекул, расстояния до которых не превышают радиуса сферы действия молекулярных сил. Более далёкие молекулы влияния на неё не оказывают. Поэтому внутри жидкости все молекулы находятся в равных условиях и, если пренебречь влиянием внешних далекодействующих воздействий вроде силы тяжести, жидкость во всех внутренних областях обладает одинаковыми свойствами. Совершая колебательные движения, молекула внутри жидкости, двигаясь в любую сторону, наталкивается на окружающие молекулы, которые действуют на неё силами отталкивания и тем самым ограничивает движение. Равнодействующая сил, которые действуют на молекулу со стороны других молекул, в среднем равна нулю. Поэтому при тех редких переходах с места на место, которые молекула совершает вследствие теплового движения, работа молекулярных сил оказывается равной нулю, и, следовательно, потенциальная энергия взаимодействия молекулы с окружающими её молекулами не изменяется.

Иначе обстоит дело с молекулами, находящимися у самой поверхности. Эти молекулы подвергаются действию других молекул практически только со стороны жидкости, поскольку плотность газа обычно (при температурах, далёких от критической) много меньше плотности жидкости. При тепловом движении силы отталкивания действуют на молекулу поверхностного слоя только при её движении внутрь жидкости. При движении наружу её возвращают к положению равновесия более слабые силы притяжения. Поэтому её среднее расстояние от более глубоких молекул несколько больше, чем расстояния между молекулами внутри жидкости, т.е. плотность жидкости в поверхностном слое меньше, чем во внутренних областях. При приближении молекулы изнутри жидкости к поверхности на

расстояние, меньше радиуса сферы действия молекулярных сил, равнодействующая сил молекулярного притяжения, действующих на молекулу, становится отличной от нуля, имея при этом направление внутрь жидкости (рис. 1). Если молекула перемещается из внутренних слоёв жидкости в поверхностный слой, эта равнодействующая совершает отрицательную работу. В результате потенциальная энергия взаимодействия рассматриваемой молекулы с другими становится больше. Если по каким-либо причинам поверхность жидкости увеличивается и в поверхностный слой выходят всё новые и новые молекулы, то вклад молекул этого слоя в потенциальную энергию жидкости возрастает пропорционально числу вышедших молекул. Это число, в свою очередь, пропорционально площади вновь образовавшейся поверхности.

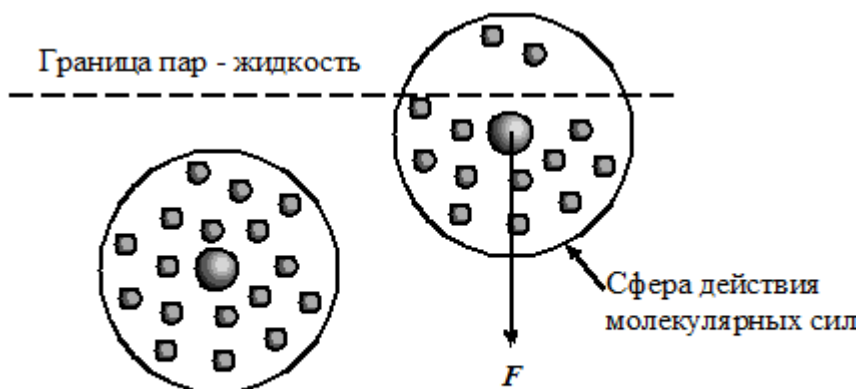


Рис. 1

Добавочную потенциальную энергию жидкости, обусловленную разницей в свойствах поверхностного слоя и внутренних областей, называют

поверхностной энергией. Величина поверхностной энергии W , как это

можно заключить из предыдущего, связана с площадью S поверхности жидкости соотношением

$$W = \sigma S, \quad (1)$$

где σ - постоянная величина, которая называется **коэффициентом поверхностного натяжения**. Коэффициент поверхностного натяжения определяется как свойствами самой жидкости, так и свойствами тела, граничащего с жидкостью по данной поверхности. В таблицах обычно приводится значение σ на границе жидкости с воздухом или жидкости с её насыщенным паром. Величина коэффициента поверхностного натяжения уменьшается с увеличением температуры и обращается в нуль при критической температуре, когда вещество не может существовать в виде двух фаз с резкой границей между ними.

Силы поверхностного натяжения

Для того, чтобы найти форму, которую может иметь данный объем жидкости в том или ином случае, легче всего воспользоваться энергетическим условием равновесия: при равновесии потенциальная энергия системы должна быть минимальной.

Потенциальная энергия, которая определяет равновесие жидкости, может включать в себя: 1) энергию взаимодействия с окружающими телами

при помощи далекодействующих сил (в земных условиях приходится иметь дело с силами тяжести), 2) поверхностную энергию и 3) энергию взаимодействия молекул внутренних областей жидкости. Минимум потенциальной энергии сил тяжести, как известно, достигается при наименьшем возможном положении центра тяжести. Минимум поверхностной энергии соответствует при прочих равных условиях наименьшей площади поверхности жидкости. Что же касается энергии взаимодействия молекул внутренних областей жидкости, то, как говорилось ранее, она не зависит от положения молекул. При изменении формы жидкости она остается постоянной и, следовательно, её не нужно принимать во внимание, несмотря на то, что общее число молекул во внутренних областях жидкости обычно во много раз превышает их число в поверхностном слое.

Таким образом, если внешними воздействиями на жидкость можно пренебречь, то она должна принимать такую форму, при которой поверхностная энергия, а вместе с тем и площадь поверхности минимальны. Как известно, при заданном объёме наименьшую площадь поверхности имеет шар. Действительно, капли дождя, маленькие капли ртути на стекле имеют форму поверхности, близкую к сферической.

Из того факта, что поверхность жидкости стремится сократиться, следует, что поверхностный слой жидкости можно уподобить растянутой упругой плёнке: внутри этого слоя со стороны одной части на другую вдоль поверхности действуют силы. Их называют **силами поверхностного натяжения**.

Наличие сил поверхностного натяжения можно обнаружить, например, на следующем простом опыте. Поместим на поверхность воды нитку со связанными концами, предварительно слегка смазанную каким-либо жиром, чтобы она не намочила (рис. 2, а). Прикоснёмся кусочком мыла к

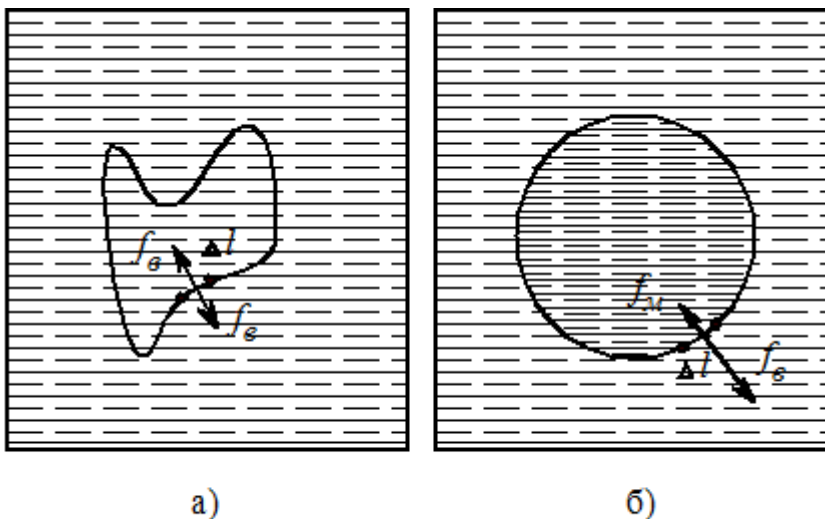


Рис. 2

поверхности мыльного раствора меньше силы \vec{f}_B чистой воды. Поэтому имеется действующая на каждый элемент нити избыточная сила,

поверхности воды внутри петли. Нитка примет форму кольца (рис. 2, б). Объяснять это явление можно тем, что на элемент длины нити Δl действуют силы поверхностного натяжения, направленные вдоль поверхности жидкости и перпендикулярные элементу. Сила \vec{f}_M

направленная наружу. Равенство сил, действующих на одинаковые элементы, обеспечивает правильную геометрическую форму кольца. Конечно, и до касания поверхности воды мылом на элементы нити действовали силы поверхностного натяжения, но величина их снаружи и внутри петли была одинакова, и первоначальное положение элементов нити поэтому сохранялось.

Несмотря на некоторое сходство поведения поверхностного слоя жидкости с поведением тонкой упругой растянутой плёнки, между ними имеются заметные различия. Упругие силы обусловлены деформацией, т.е. изменением расстояния между молекулами. При увеличении деформации (растяжении плёнки) они возрастают и исчезают, если деформация отсутствует. Происхождение поверхностного натяжения связано с выходом на поверхность новых молекул при увеличении поверхности и уходом их вглубь жидкости при её сокращении. Величина их не зависит от размеров поверхности. Силы поверхностного натяжения не могут стать равными нулю - они всегда имеются, пока есть поверхность.

Действие сил поверхностного натяжения удобно рассматривать на опытах с мыльными плёнками, натянутыми на проволочные каркасы. Такие пленки настолько тонки, что действие внешних сил на жидкость, заключённую между двумя поверхностными слоями, можно не учитывать и

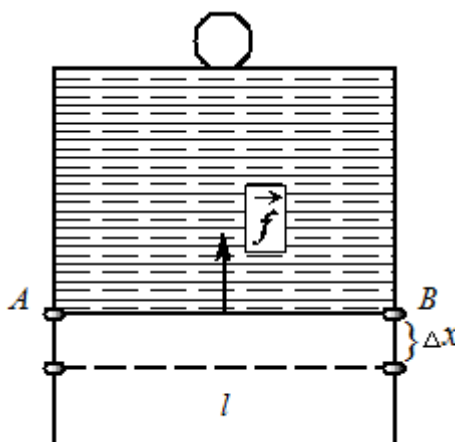


Рис. 3

считать, что все явления в этом случае сводятся к поверхностным. Рассмотрим проволочную рамку с подвижной переключиной AB , длина которой l (рис. 3). Пусть на рамку натянута мыльная плёнка. Плёнка имеет две стороны и соответственно два поверхностных слоя. Поверхность пленки стремится сократиться. При этом на переключину, независимо от её положения со стороны каждого из двух поверхностных слоёв, действует сила поверхностного натяжения \vec{f} . При перемещении переключины

на расстояние Δx силы поверхностного натяжения совершают работу, величина которой $\Delta A = 2f\Delta x$. Эта работа (при неизменной температуре) равна изменению ΔW поверхностной энергии плёнки. Общая площадь поверхностных слоёв при растяжении пленки увеличится на величину $\Delta S = 2l\Delta x$ и, согласно формуле (1), при этом произойдёт изменение поверхностной энергии $\Delta W = \sigma\Delta S = 2\sigma l\Delta x$. Приравнивая ΔA и ΔW , найдём

$$f = \sigma l, \quad (2)$$

т.е. величина силы поверхностного натяжения, действующей на отрезок какого-либо контура на поверхности жидкости, пропорциональна длине l этого отрезка, причём коэффициентом пропорциональности служит коэффициент поверхностного натяжения.

Смачивание и не смачивание. Капиллярные явления

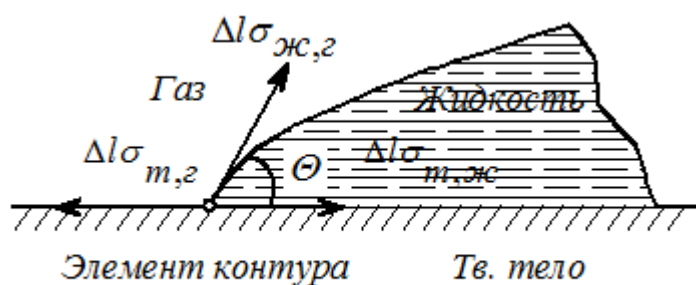


Рис. 4

До сих пор мы рассматривали поверхностную энергию одной среды. Когда граничат друг с другом сразу три вещества - твердое, жидкое и газообразное нужно учитывать суммарную поверхностную энергию трех граничащих друг с другом

веществ. Контур, по которому граничат все три вещества, располагается на поверхности твердого тела так, чтобы сумма проекций трех приложенных к каждому элементу Δl контура сил поверхностного натяжения $\Delta \sigma_{ik}$ на направление, в котором элемент контура может перемещаться, т. е. направление касательной к поверхности твердого тела, равнялась нулю (рис. 4).

Угол θ , отсчитываемый внутри жидкости между касательными к поверхностям твердого тела и жидкости, называется **краевым углом**.

Обозначим поверхностное натяжение на границе твердого тела и жидкости - через $\sigma_{т,ж}$, на границе твердого тела и газа - $\sigma_{т,г}$ и на границе жидкости и газа - через $\sigma_{ж,г}$. В зависимости от соотношения между этими величинами краевой угол может принимать значения от 0 до π . Если $\sigma_{т,г} > \sigma_{т,ж}$, угол θ оказывается острым, если $\sigma_{т,г} < \sigma_{т,ж}$, угол θ тупой. В первом случае говорят о **частичном смачивании**, а во втором о **частичном не смачивании** жидкостью твердого тела. Если угол θ равен нулю, то говорят, что имеет место **полное смачивание**. Из равенства проекций сил поверхностного натяжения на направление касательной к поверхности твердого тела следует, что

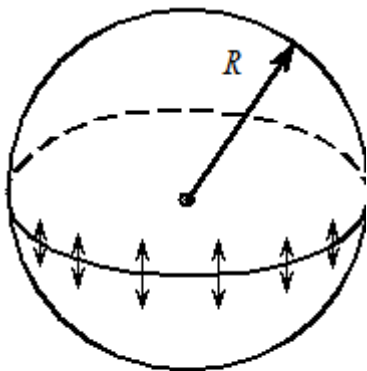
$$\cos \theta = \frac{\sigma_{т,ж} - \sigma_{т,г}}{\sigma_{ж,г}}. \quad (3)$$

Стремление поверхности жидкости к сокращению приводит к тому, что давление под искривленной поверхностью жидкости оказывается иным, чем под плоской поверхностью. Добавочное давление, обусловленное искривлением поверхности, очевидно, должно зависеть от поверхностного натяжения σ и кривизны поверхности. Вычислим добавочное давление для сферической поверхности жидкости. Рассечем мысленно сферическую каплю жидкости радиуса R плоскостью на два полушария (рис. 5). Из-за поверхностного натяжения поверхностные слои полушарий притягиваются друг к другу с силой

$$F = 2\pi R\sigma. \quad (4)$$

Эта сила прижимает полушария друг к другу по поверхности площади

$S = \pi R^2$ и, следовательно, обуславливает дополнительное давление



$$\Delta p = \frac{F}{S} = \frac{2\pi R\sigma}{\pi R^2} = \frac{2\sigma}{R}. \quad (5)$$

Кривизна сферической поверхности всюду одинакова и принимается равной $1/R$.

Рис. 5

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Общий вид установки представлен на рис. 6. Установка состоит из *раздвижной подставки*, на которую устанавливается *чашка Петри* с исследуемой жидкостью. *Измерительное кольцо* (далее *кольцо*) подвешивается на трех нитях к *прецизионному динамометру*, с ценой деления 1мН . Кольцо в данной задаче представляет собой цилиндрическую оболочку из дюрала (сплав алюминия с *Си*, *Mg* и *Mn*) диаметром $d = 58.3$ мм и толщиной 0.2 мм. Верхняя петля динамометра закреплена на подвижной штанге, перемещающейся по вертикальной стойке. При измерениях с помощью *винта* чашка Петри поднимается раздвижной подставкой до контакта кольца с жидкостью, а затем медленно опускается. При опускании чашки Петри кольцо начинает подниматься над поверхностью жидкости. Вместе с ним начинает подниматься и обволакивающая кольцо пленка жидкости, а показание динамометра при этом постепенно увеличивается (рис. 7). Оно достигает максимального значения F_0 в момент разрыва водяной пленки и отрыва кольца. Расчеты показывают, что весом пленки жидкости, которая поднимается вместе с кольцом, можно пренебречь. Тогда в предположении полного смачивания сила F_0 , действующая на кольцо в момент отрыва равна

$$F_0 = F + P, \quad (6)$$

где F - сила поверхностного натяжения, $P = mg$ - вес кольца (показание динамометра, когда кольцо не погружено в жидкость).

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

$$F = \sigma l = \sigma \pi d \quad (7)$$

где l - длина контура поверхности, вдоль которой действует сила, d - диаметр кольца. В данном случае l равна длине внутренней и внешней

окружности кольца, а если кольцо тонкое, как в нашем случае, можно считать, что его внешний и внутренний диаметр, примерно, равны, тогда:

$$F = \sigma 2\pi d . \quad (8)$$

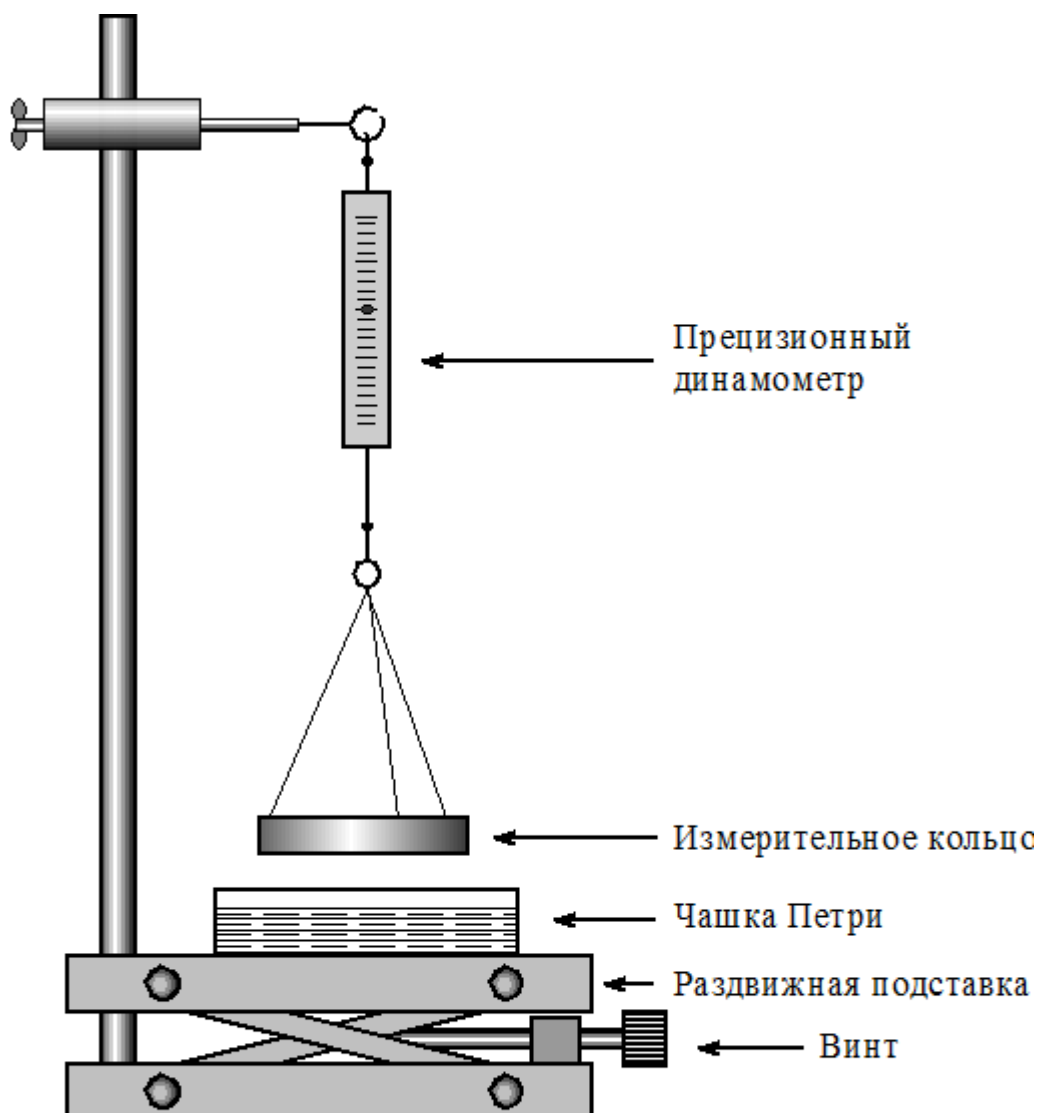


Рис. 6

Отметим, что формула (8) получена для случая полного смачивания. В остальных случаях нужно вводить безразмерный поправочный коэффициент k , зависящий от материала кольца и состояния его поверхности, в том числе наличия микрорельефа. В современных тензиометрах данного типа промышленным стандартом является полированное кольцо из сплава платина-иридий. Таким образом, формулу для полной силы со стороны жидкости в момент отрыва кольца можно представить в виде:

$$F = k\sigma 2\pi d . \quad (9)$$

Из уравнения (6) и формул (7) и (8) следует, что, зная разницу между показаниями динамометра в момент отрыва кольца и его весом - $F = F_0 - P$,

можно получить выражение для определения коэффициента поверхностного натяжения:

$$\sigma = \frac{F_0 - P}{k2\pi d} . \quad (10)$$

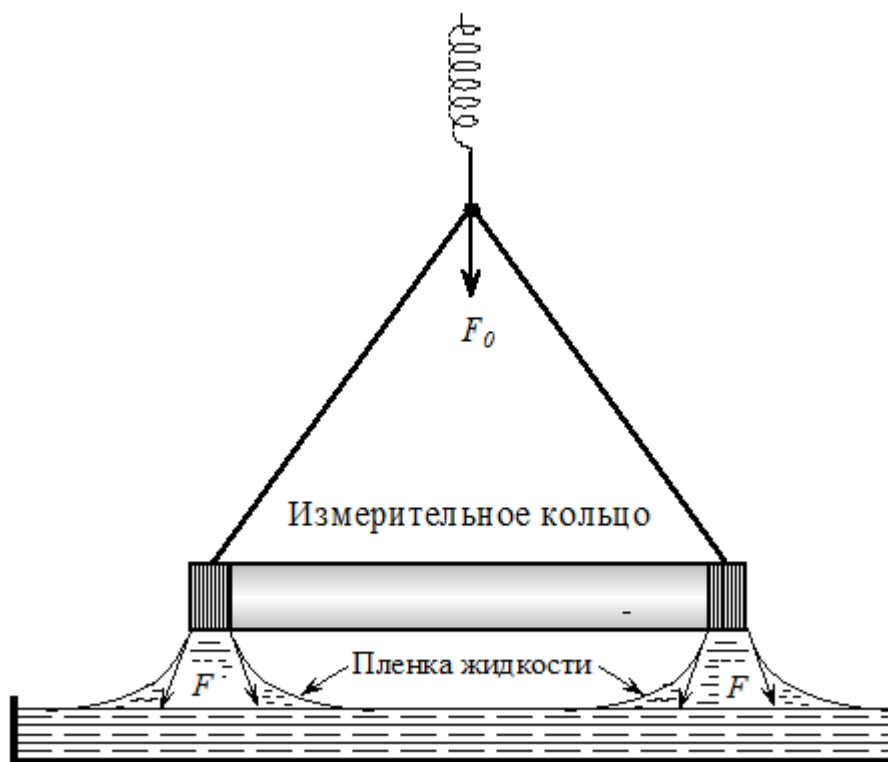


Рис. 7

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Подготовка к измерениям

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

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

Проведение эксперимента

Выполнять работу следует предельно аккуратно, не трясти и не толкать установку, поскольку это может исказить результаты. Работу следует делать в строгом соответствии с нижеизложенным порядком выполнения и в объеме, предусмотренном индивидуальным заданием.

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

1. Вращая винт, опустите подставку.
2. Наполните чашку Петри, примерно, наполовину раствором и установите ее на подставку.
3. Поднимая подставку с чашкой, погрузите кольцо в раствор на глубину не более $1/3$ его высоты, не допуская намокания нитей подвеса.
4. Наблюдая за показаниями динамометра, плавно и медленно поворачивая винт опускайте подставку до тех пор пока не разорвется водяная пленка на кольце. Запомните величину максимальной силы F_0 в момент отрыва кольца от раствора и запишите ее в табл. 1.

После отрыва кольца от жидкости подождите окончания колебаний кольца на пружине динамометра.

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

5. Повторите измерения 5 раз. Результаты запишите в табл. 1.

Выполнив последнее измерение, замените раствор в чашке и проведите измерения с новым раствором (п. 2-5), записывая результаты в таблицу аналогичную табл. 1. Выбирая сосуд для слива раствора, обращайтесь внимание на концентрацию раствора в сосуде. **Не допускайте смешивания растворов.**

Таблица 1

№	$F_{отр.} \cdot 10^{-3}$, Н/м	$\bar{F}_{отр.} \cdot 10^{-3}$, Н/м $\Delta F, \varepsilon$	$\bar{F}_{отр.} - P$	$\sigma = \frac{\bar{F} - P}{k \cdot 2\pi d}$, $\Delta\sigma, \varepsilon$
1				
2				
3				
4				
5				

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Для каждой концентрации раствора:

1. Найдите для чистой воды силу поверхностного натяжения как разность сил при отрыве кольца от воды F_0 и веса P кольца в воздухе.

$$F = F_0 - P.$$

2. По формуле

$$k = \frac{F_0 - P}{\sigma_{\text{табл.}} \cdot 2\pi d},$$

воды

где $\sigma_{\text{табл.}} = 72.7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ вычислите поправочный коэффициент k .

3. По формуле

$$\sigma = \frac{F_0 - P}{k \cdot 2\pi d}$$

рассчитайте коэффициенты поверхностного натяжения растворов (в том числе и чистой воды).

4. Вычислите абсолютную и относительную погрешности всех измерений. Приборная погрешность динамометра $\pm 0.5 \text{ мН}$.
5. Постройте график зависимости σ от концентрации раствора.

ЛИТЕРАТУРА

Савельев И.В. "Общий курс физики". Том. 1. Механика, Колебания и волны, Молекулярная физика. 2009 г. Глава XVI, § 142-146.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое поверхностное натяжение?
2. Силовое и энергетическое определения коэффициента поверхностного натяжения.
3. Как направлены силы поверхностного натяжения по отношению к поверхности жидкости и по отношению к линии, ограничивающей поверхность жидкости?
4. Как влияет температура на поверхностное натяжение? При какой температуре коэффициент поверхностного натяжения обращается в нуль?
5. Выведите формулу для определения добавочного давления для сферической поверхности жидкости.