

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ВОДЫ НА ГРАНИЦЕ С ВОЗДУХОМ МЕТОДОМ ОТРЫВА КОЛЬЦА

Цель и содержание работы

Целью работы является изучение поверхностных свойств жидкостей и ознакомление с одним из методов измерения коэффициента поверхностного натяжения.

Содержание работы – определение коэффициента поверхностного натяжения воды на границе с воздухом при комнатной температуре методом отрыва кольца.

Краткая теория

Жидкости – вещества в конденсированном агрегатном состоянии, промежуточном между твердым и газообразным. Молекулы в жидкостях находятся на расстояниях, сравнимых с их размерами, так что вся система имеет вполне определенный объем.

Главными особенностями жидкостей (по сравнению с газами) являются способность сохранения объема, а также наличие свободной поверхности. (Как известно, объем газа определяется объемом сосуда, который он занимает.)

Во всех телах (твердых, жидких, газообразных) молекулы взаимодействуют друг с другом. Однако силы взаимодействия молекул в сильной степени зависят от расстояния между ними. Эти силы имеют электромагнитную, а также квантовую природу. Опыты показывают, что, начиная с некоторого расстояния, которое называется *радиусом молекулярного действия* (порядка 1 нм), межмолекулярным взаимодействием можно пренебречь.

На рис. 1 приведена качественная зависимость сил межмолекулярного взаимодействия молекул от расстояния r между ними.

Расстояние r_0 соответствует равновесному расстоянию между молекулами, когда силы притяжения компенсируются силами отталкивания. При $r < r_0$ преобладают силы отталкивания, при $r > r_0$ – силы притяжения.

Обычно считают, что

$$F_{\text{отт}} = \frac{C_1}{r^{13}} \quad F_{\text{пр}} = -\frac{C_2}{r^2} \quad (1)$$

Силы межмолекулярного *притяжения* часто называют ван-дер-ваальсовыми силами, они имеют электрическую природу. Существование сил *отталкивания* удалось объяснить только в квантовой механике. Силы отталкивания меняются с расстоянием значи-

тельно быстрее сил притяжения. Именно силы отталкивания не позволяют молекулам сблизиться на сколь угодно малое расстояние.

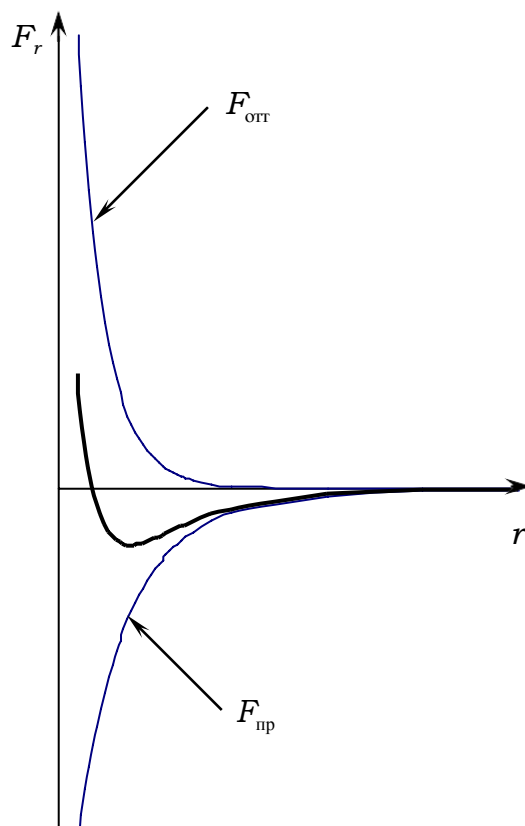


Рис.1. Зависимость сил притяжения ($F_{\text{пр}}$), отталкивания ($F_{\text{отт}}$) и результирующей силы (F_r) от расстояния между молекулами

Важной характеристикой взаимодействия молекул является *потенциальная энергия*. Характерным параметром, определяющим, будет ли вещество находиться в газообразном, жидком или твердом состоянии, является соотношение между *величиной* средней потенциальной энергии молекулы и средней кинетической энергии (kT) ее теплового движения. Для твердых тел $E_p \gg kT$, в газах $E_p \ll kT$, в жидкостях величина $E_p \geq kT$.

Рассмотрим потенциальную энергию взаимодействия E_p двух молекул, находящихся на расстоянии r друг от друга (рис. 2). Эта зависимость описывается уравнением:

$$E_p = -\frac{a_1}{r^6} + \frac{a_2}{r^{12}}. \quad (2)$$

Как видно (рис. 2), потенциальная кривая $E_p(r)$, характеризующая межмолекулярное взаимодействие молекул, имеет вид потенциальной ямы с минимумом в точке r_0 .

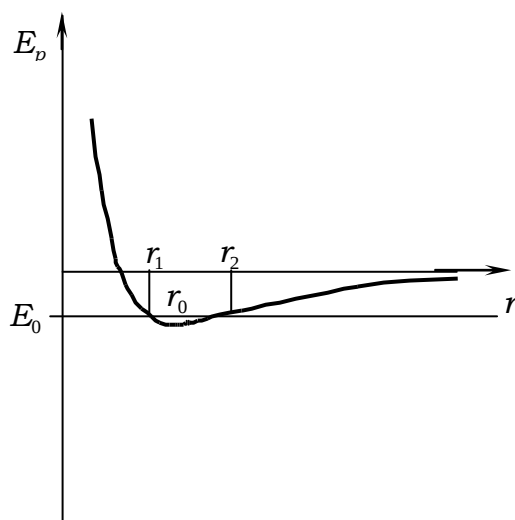


Рис. 2. Зависимость потенциальной энергии от расстояния между молекулами.

Напомним, что $F_r = -\frac{dE_p}{dr}$. В точке r_0 , соответствующей экстремуму функции, $F_r = 0$, что соответствует равновесному состоянию. На бесконечно большом расстоянии друг от друга молекулы не взаимодействуют, E_p стремится к нулю (рис.2).

Характер и границы движения молекул зависят от их полной энергии. Так, например, в конденсированном жидком состоянии *полная энергия – отрицательная*.

Рассмотрим границы движения молекул. Пусть одна из молекул находится в начале координаты $r = 0$. Другая молекула движется по оси r , причем ее полная энергия отрицательна и по величине равна $-E_0$ (рис.2). В этом случае молекула может двигаться в области от r_1 до r_2 , где ее полная энергия больше или равна потенциальной, что согласуется с законом сохранения энергии.

r_1 – минимальное расстояние, на которое могут сблизиться центры молекул при данной полной энергии. Оно называется *эффективным диаметром молекулы*. В точках r_1 и r_2 молекула останавливается, ее потенциальная энергия равна полной, а средняя кинетическая энергия равна нулю. В точке r_0 ее потенциальная энергия минимальна, а средняя кинетическая энергия максимальна. (см. рис. 2).

Расчеты показывают, что для жидкостей области проявления молекулярных сил малы (порядка нескольких ангстрем).

Для всех тел, находящихся в конденсированном состоянии, характерно наличие свободных поверхностей, ограничивающих их объем. Строго говоря, следует говорить не просто о поверхности тел, а о поверхности раздела двух сред. Наличие у жидких тел свободных по-

верхностей приводит к существованию особой категории явлений, называемых поверхностными.

Поверхность раздела между фазами (жидкость/пар) представляет собой переходный слой, в котором плотность меняется от плотности жидкости до плотности пара. При обычных температурах этот слой тонок и его толщина измеряется несколькими молекулярными диаметрами, при повышении температуры толщина переходного слоя увеличивается.

Молекулы в поверхностном слое находятся в условиях, отличных от условий внутри жидкости. Равнодействующая сил для молекул внутри жидкости равна нулю, в то время как на молекулы поверхностного слоя действует результирующая сила, направленная внутрь жидкости нормально к поверхности. Таким образом, поверхностный слой обладает избыточной энергией, обусловленной различием межмолекулярных взаимодействий в обеих фазах.

Разность между энергией всех молекул (обеих сред) вблизи поверхности раздела и той энергией, которую его молекулы имели бы, если бы они находились внутри жидкости, называется поверхностной энергией U_s . При увеличении поверхности раздела, т.е. при переводе части молекул из глубины жидкости в пограничный слой, необходимо совершить работу против молекулярных сил. Очевидно, что поверхностная энергия пропорциональна площади S поверхности раздела $U_s \sim S$.

Работа, которую надо затратить, чтобы увеличить площадь поверхности раздела фаз на единицу поверхности, называется коэффициентом поверхностного натяжения (или просто поверхностным натяжением). Это "энергетическое" определение σ .

$$\sigma = \frac{U_s}{S} \quad (3)$$

Коэффициент поверхностного натяжения σ зависит от природы соприкасающихся сред и их состояния.

Известно, что любая система занимает состояния с наименьшей потенциальной энергией. Поэтому поверхность жидкости стремится уменьшить свою площадь. Именно с этим связано стремление капелек жидкости (или пузырьков газа) принять сферическую форму. В этом отношении тонкий поверхностный слой действует наподобие резиновой оболочки, которой окружен объем жидкости. Возникающие в этом слое поверхностные силы, действующие вдоль поверхности, всегда стремятся сократить площадь поверхности раздела фаз. При этом величина поверхностного натяжения не изменяется при изменении площади поверхности.

Наряду с "энергетическим" определением можно ввести "силовое" определение коэффициента поверхностного натяжения. Пусть поверхность ограничена линией или контуром длины L , то поверхностное натяжение можно представить как отношение силы F к длине этой линии или контура.

$$\sigma = \frac{F}{L} \quad (4)$$

Сила поверхностного натяжения действует в плоскости, касательной к поверхности раздела. Она перпендикулярна к линии, ограничивающей поверхность жидкости, и направлена в сторону уменьшения площади поверхности.

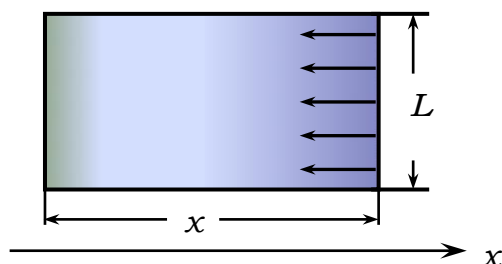


Рис. 3. Пленка жидкости, натянутая на рамку.

Рассмотрим следующий пример. Представим себе пленку жидкости, натянутую на проволочную рамку, одна из сторон которой (длины L) может перемещаться (рис. 3).

Благодаря стремлению поверхности уменьшиться, на проволочку будет действовать сила. Эта сила определяется производной от энергии по координате вдоль направления действия силы.

$$F_x = -\frac{dU_{\text{пов.}}}{dx} = -\sigma \frac{dS}{dx}. \quad (5)$$

Увеличим площадь поверхности на Ldx , тогда, согласно формуле (4), $F = -\sigma L$, что согласуется с формулой (4). Это и есть сила, действующая на отрезок L рамки и обусловленная поверхностным натяжением. (Так как пленка имеет две стороны, то на отрезок рамки будет действовать сила, вдвое большая). Знак минус показывает, что эта сила направлена внутрь поверхности пленки. Ниже приведены значения коэффициента поверхностного натяжения при температуре 20°C для различных веществ.

Вещество	σ , мН/м
Руть / пары	484
Вода / пары	73
Глицерин / пары	64
Нефть / вода	25 – 35

Итак, поверхностное натяжение появляется при различии в межмолекулярных взаимодействиях в фазах, образующих поверхность раздела. Таким образом, необходимым и достаточным условием существования поверхности раздела, а, следовательно, и поверхностного натяжения, является, во-первых, *наличие сил притяжения между молекулами*, приводящих к конденсации и, во-вторых, *различие в величине этих сил в граничащих фазах*.

С ростом температуры происходит уменьшение поверхностного натяжения вплоть до *обращения его в нуль при критической температуре, где исчезает различие между жидкостью и паром*.

Величина поверхностного натяжения может сильно меняться при введении в жидкость примесей. Существует целый класс так называемых поверхностно активных веществ (ПАВ), способных адсорбироваться на поверхности раздела фаз с соответствующим понижением их поверхностного натяжения. Для воды такими веществами являются различные мыла.

Поверхностное натяжение на границе раздела нефть-вода в среднем порядка (0,025-0,035) Н/м. Для увеличения нефтеотдачи пластов часто требуется снизить межфазное натяжение. Эффективным методом является метод заводнения пластов растворами ПАВ или нагнетание в пласт щелочных вод. Они способствуют образованию натриевых мыл вблизи поверхности раздела вода-нефть и тем самым уменьшают поверхностное натяжение нефти на границе с водой. Введение в пласт углекислого газа CO_2 (растворенного в воде или в жидком виде), при котором происходит взаимное растворение углекислоты в нефти, также приводит к снижению межфазного натяжения.

Если поверхность раздела фаз не плоская, то по обе стороны искривленной поверхности существует разность давлений, вызванная поверхностным натяжением. Это добавочное давление называется *поверхностным или капиллярным давлением* ($P_{\text{пов}}$).

В данной работе при опускании металлического кольца в воду, его стенки смачиваются водой. Между нижним краем кольца и опускающейся поверхностью воды образуется упругая водная пленка.

При опускании чашки с водой пленка растягивается, увеличивая свою поверхность. *Силы поверхностного натяжения* стремятся уменьшить величину поверхности растягиваемой пленки (рис. 5). Одновременно они действуют на кольцо, оттягивая его вниз, что и приводит к растяжению пружины.

Если D_1 и D_2 – внешний и внутренний диаметры металлического кольца, то суммарная длина двух окружностей, проведенных на внешней и внутренней поверхностях водной пленки, равна $\pi(D_1 + D_2)$.

Тогда величина силы поверхностного натяжения:

$$F = \sigma \pi (D_1 + D_2) .$$

Откуда

$$\sigma = \frac{F}{\pi (D_1 + D_2)} . \quad (6)$$

Здесь σ – коэффициент поверхностного натяжения воды на границе с воздухом, определяемый в работе

Приборы и принадлежности, необходимые для выполнения работы

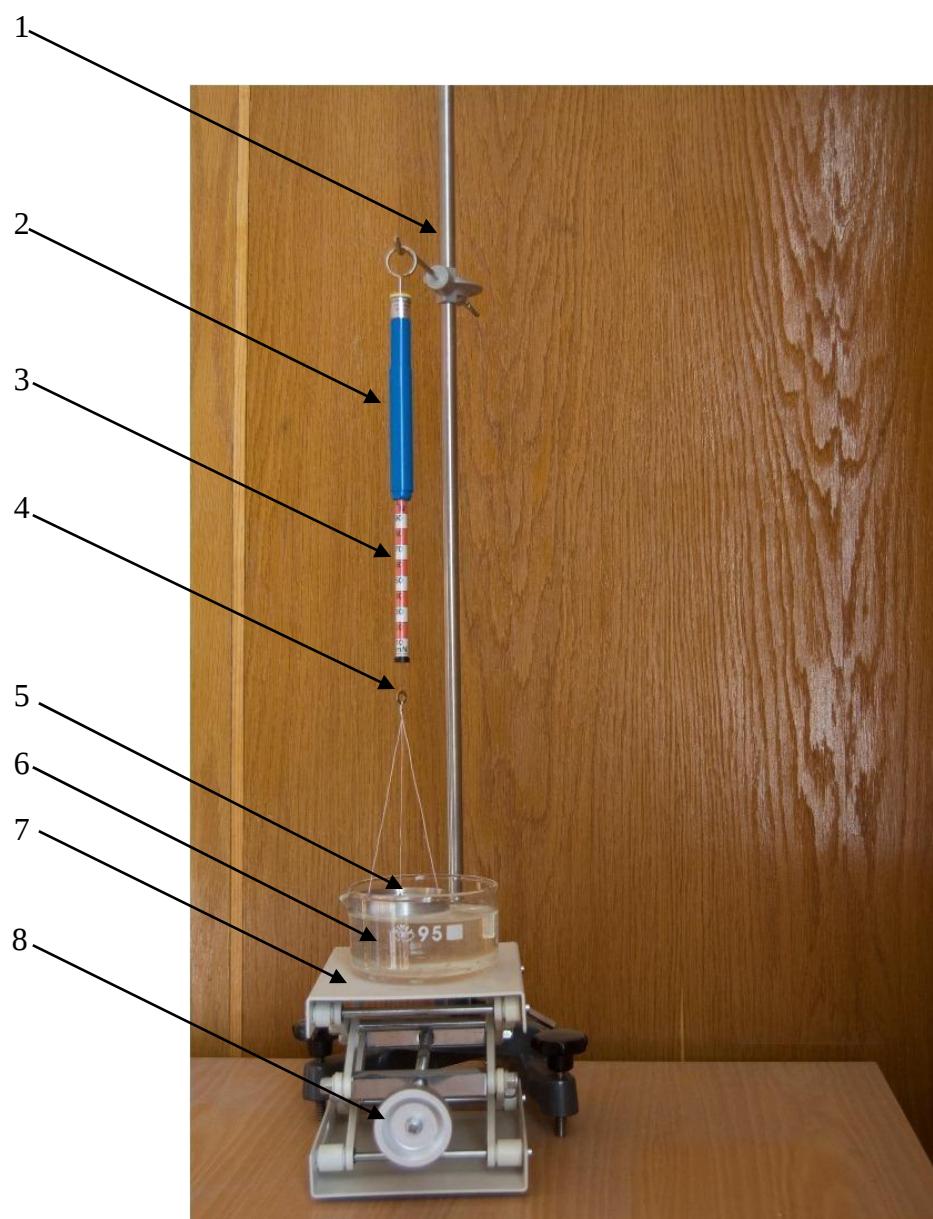


Рис. 4. Установка для измерения коэффициента поверхностного натяжения

а) *Динамометр* (рис. 4) (2) со шкалой в мН (3), подвешенный на вертикальном металлическом штативе (1). К динамометру прикрепляется металлическая дужка (4), на которую подвешивается металлическое кольцо (5). Под этим кольцом находится поднимающийся и опускающийся столик (7), высота которого регулируется винтом (8). На столик ставится чашка с водой (6).

б) *Штангенциркуль* для измерения внутреннего и внешнего диаметров кольца, снабженный нониусом (точность которого 0,05 мм).

Порядок выполнения работы

Перед проведением опытов края кольца должны быть тщательно вытерты куском фильтровальной бумаги для удаления следов воды. Следует учитывать, что прикосновение пальцев к поверхности стекла или металла сильно ухудшает смачиваемость этих поверхностей.

1. Столик, на котором стоит чашка с водой, поднять с помощью винта (8) на такую высоту, чтобы *нижний* край металлического кольца погрузился в воду примерно на 5 мм. При этом стенки металлического кольца смачиваются водой.

Между *нижним* краем кольца (1) и опускающейся поверхностью воды (3) образуется упругая водяная пленка (рис. 5). При дальнейшем опускании уровня воды пленка несколько растягивается и оттягивает вниз смоченный водой край кольца, а вместе с тем растягивает и упругую пружину динамометра (2), на которой висит кольцо. Стрелками на рис. 5 указано направление сил поверхностного натяжения жидкости на границе с кольцом.

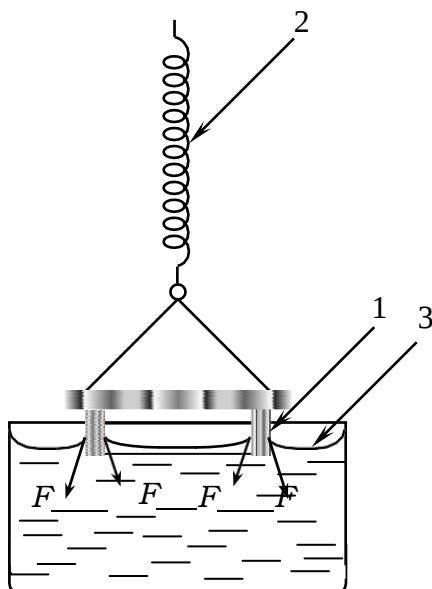


Рис. 5. Силы поверхностного натяжения, действующие на кольцо.

2. Столик с чашкой начать медленно опускать, вращая винтом (8). Наблюдая за показаниями динамометра, определить по динамометру положение шкалы в момент отрыва кольца от поверхности воды.

3. Результат измерения занести в таблицу.

4. Повторить п.п. 2, 3 еще 4 раза.

5. Измерить внутренний диаметр кольца штангенциркулем 5 раз. Результат занести в таблицу.

6. Измерить внешний диаметр кольца штангенциркулем 5 раз. Результат занести в таблицу.

Таблица

№ п/п	F , мН	ΔF , мН	D_1 , мм	ΔD_1 , мм	D_2 , мм	ΔD_2 , мм	σ , Н/м
1							
2							
3							
4							
5							
среднее							

Обработка результатов измерений

1. Найти среднее арифметическое полученных значений F . Результат занести в таблицу.

2. Определить погрешность ΔF полученных результатов. Результат занести в таблицу.

3. Рассчитать погрешности ΔD_1 и ΔD_2 . Полученные данные занести в таблицу.

4. Рассчитать относительную погрешность определения σ :

$$\varepsilon\sigma = \sqrt{\left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 + \frac{\Delta D_1^2 + \Delta D_2^2}{(D_1 + D_2)^2}}.$$

5. Определить необходимое число значащих цифр в числе π , исходя из соотношения $\varepsilon_\pi = 0,1\varepsilon_\sigma$.

6. Зная средние значения $\bar{F}$, $\bar{D}_1$ и $\bar{D}_2$ по формуле (6) рассчитать среднее значение $\bar{\sigma}$:

$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{F}}{\pi(\bar{D}_1 + \bar{D}_2)}$$

7. Рассчитать абсолютную погрешность $\Delta\sigma$:

$$\Delta\sigma = \varepsilon_{\sigma} \cdot \bar{\sigma}$$

8. Записать окончательный результат в виде:

$$\sigma = \bar{\sigma} \pm \Delta\sigma$$

Контрольные вопросы

1. Приведите силовое и энергетическое определение коэффициента поверхностного натяжения и укажите его размерность.
2. Нарисуйте график зависимости энергии взаимодействия двух молекул от расстояния между ними.
3. Чем обусловлено существование сил поверхностного натяжения?
4. Как коэффициент поверхностного натяжения зависит от температуры? При какой температуре его значение равно нулю?
5. Что называется поверхностной энергией? Почему жидкость стремится уменьшить свою поверхность?
6. Чем обусловлено существование дополнительного давления, создаваемого искривленной поверхностью жидкости?
7. Каким образом в настоящей работе определяется коэффициент поверхностного натяжения?
8. На что затрачивается работа при увеличении поверхности жидкости?
9. Выведите расчетную формулу (6).
10. Опишите характер взаимодействия молекул в жидкости.
11. Какими способами можно уменьшить поверхностное натяжение?
12. Что такое ПАВ, какова их роль в нефтеотдаче?
13. Объясните капиллярное поднятие (опускание) жидкости.
14. Почему рыхление почвы способствует сохранению в ней влаги?

Литература

1. Савельев П.В. Курс физики. т.1.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. т.2.