

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ОПЫТНЫМ ПУТЁМ

Мизина Д.А., Немтинова А.В.

МАОУ «Гимназия №6», 10 класс

Научный руководитель: Ярусова И.В., МАОУ «Гимназия №6»

Данная статья является реферативным изложением основной работы. Полный текст научной работы, приложения, иллюстрации и иные дополнительные материалы доступны на сайте III Международного конкурса научно-исследовательских и творческих работ учащихся «Старт в науке» по ссылке: <https://www.school-science.ru/0317/11/27919>.

В окружающем нас мире существуют силы, действие которых мы ощущаем ежедневно – силы тяготения, упругости и трения. Но есть ещё одна сила, на которую обычно мало или совсем не обращают внимания. Она сравнительно невелика, её работа никогда не вызывает мощных эффектов. Тем не менее мы ничего не можем проделать с какой-либо жидкостью без того, чтобы не привести в действие силы, которые являются предметом нашего исследования. Это силы поверхностного натяжения.

С поверхностным натяжением жидкости мы сталкиваемся изо дня в день: отдельные капли воды стремятся принять форму, близкую к шарообразной. (При свободном падении возникает состояние невесомости, и поэтому дождевые капли почти строго шарообразны. Из-за преломления солнечных лучей в этих каплях возникает радуга. Не будь капли сферическими не было бы, как показывает теория, и радуги); струя воды из-под крана стремится к цилиндрической форме; многие насекомые могут скользить по поверхности воды – любой может вспомнить множество подобных примеров из жизни.

Понятие поверхностного натяжения впервые ввел Янош Андраш Сегнер в 1752 году. Во второй половине XIX века Джозайя Уиллард Гиббс развил термодинамическую теорию поверхностных явлений, в которой решающую роль играет поверхностное натяжение. В XX веке разрабатываются методы регулирования поверхностного натяжения с помощью ПАВ и электрокапиллярных эффектов. В 1983 году было доказано теоретически и подтверждено данными из справочников, что понятие поверхностного натяжения жидкости однозначно является частью понятия внутренней энергии. Среди современных актуальных проблем – развитие молекулярной теории поверхностного натяжения различных жидкостей, включая расплавленные металлы.

Силы поверхностного натяжения играют существенную роль в явлениях природы, биологии, медицине, в различных современных технологиях, полиграфии, технике, в физиологии нашего организма. Поэтому очень важным шагом в науке стало открытие методов измерения коэффициента поверхностного натяжения жидкостей.

Гипотеза. В жидкостях существует поверхностное натяжение. Коэффициент поверхностного натяжения реально измерить в лабораторных условиях. Его значение зависит от рода жидкости, её температуры и наличия примесей.

Цель. Исследовать явление поверхностного натяжения жидкостей и опытным путём измерить коэффициент поверхностного натяжения.

Задачи:

1. Изучить структуру жидкости на молекулярном уровне, понять, чем вызвано явление поверхностного натяжения;
2. Провести опыты, подтверждающие на практике существование силы поверхностного натяжения;
3. Вывести формулы нахождения силы и коэффициента поверхностного натяжения жидкости;
4. Познакомиться с методами измерения коэффициента поверхностного натяжения жидкости;
5. Используя доступный метод, опытным путём измерить коэффициент поверхностного натяжения различных жидкостей и узнать, от чего он зависит;
6. Оформить результаты исследований в виде таблиц и графика.

Методы исследования:

- Эксперимент (серия опытов);
- Сравнение, анализ;
- Индуктивные и дедуктивные методы;
- Изучение литературы;
- Счёт, измерение.

Молекулярная картина поверхностного слоя жидкости

С точки зрения современной физики, жидкости являются наиболее сложным предметом исследований, потому что по сравнению с газами уже нельзя говорить о пренебрежимо малой энергии взаимодействия между молекулами, а по сравнению

с твердыми телами нельзя говорить об упорядоченном расположении молекул жидкости. Это приводит к тому, что жидкости обладают рядом интересных свойств и их проявлений.

Молекулы у поверхности раздела двух сред находятся в иных условиях, чем молекулы в глубине жидкости. Молекулу в глубине жидкости окружают со всех сторон соседние молекулы (равнодействующая равна нулю). Молекула же поверхности жидкости подвергается действию силы притяжения, во-первых, со стороны других молекул, находящихся внутри жидкости, а во-вторых, со стороны молекул газа, концентрация которых в обычных условиях много меньше концентрации молекул жидкости. Поскольку со стороны жидкости на нее действует гораздо больше молекул, то равнодействующая всех межмолекулярных сил будет направлена внутрь жидкости.

В результате действия молекулярных сил притяжения и отталкивания, плотность жидкости в поверхностном слое оказывается меньше, чем в глубине. Молекулы поверхностного слоя находятся в среднем на больших расстояниях друг от друга, чем молекулы внутри жидкости. Жидкость в поверхностном слое находится в растянутом, напряженном состоянии. Молекулы поверхности обладают избытком потенциальной энергии по сравнению с энергией, которой эти молекулы обладали бы, находясь внутри жидкости, а любая механическая система стремится к устойчивому равновесию, связанному с минимумом потенциальной энергии. Поэтому поверхностный слой производит на жидкость молекулярное давление. Под действием сил молекулярного давления молекулы, если могут, переходят из поверхностного слоя в глубь жидкости и поверхность её становится минимальной для данных условий (на Земле вода в сосуде имеет горизонтальную поверхность под действием сил тяжести).

Действием сил молекулярного давления можно объяснить малую сжимаемость жидкости – она уже сжата значительными силами. Эти силы не передаются по закону Паскаля, действуя только на молекулы жидкости, а не на погруженные в нее тела. Молекулы жидкости располагаются друг от друга на расстояниях, немного меньших двух радиусов молекул, поэтому силы отталкивания компенсируют давление поверхностного слоя.

Промежуточный вывод: силу, которая действует вдоль поверхности жидкости перпендикулярно линии, ограничивающей эту поверхность, и стремится сократить её до минимума, называют силой поверхностного натяжения.

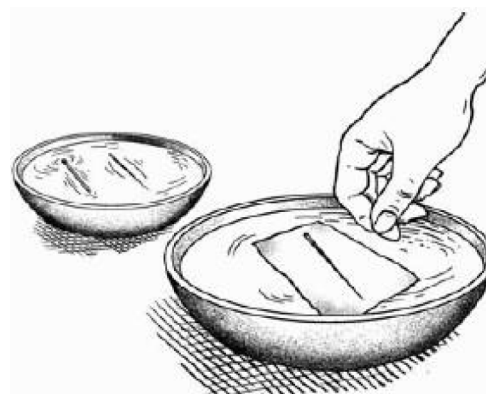
Силы поверхностного натяжения максимальны у поверхности жидкости и постепенно уменьшаются до нуля на глубине, равной радиусу молекулярного действия.

Опыты, подтверждающие существование сил поверхностного натяжения

В существовании этой силы можно убедиться, проделав несколько опытов:

1. Пусть свободно расположенная нить находится на мыльной пленке. Силы поверхностного натяжения, приложенные у нити, уравниваются, и их сумма, действующая на любой элемент нити, равна нулю. Прорвём пленку под нитью. Тогда под действием сил поверхностного натяжения нить примет положение 2.

2. Стальную иглу возможно легко заставить плавать. Достаточно смазать её маслом или жиром, то есть защитить от промокания. Когда мы поместим иголку на поверхность воды, она окажется на дне водяной лодочки, поддерживаемой водяной пленкой, которая стремится расправиться под действием сил поверхностного натяжения.

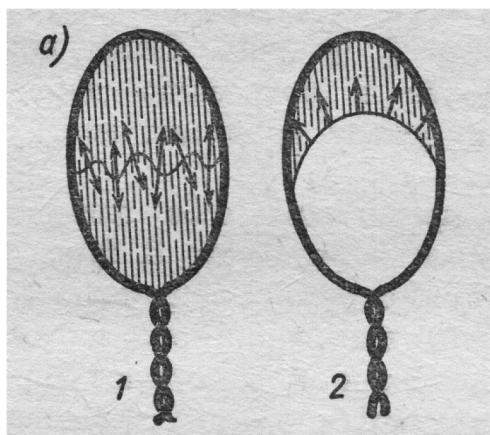


Промежуточный вывод: существование сил, параллельных поверхности жидкости и уменьшающих её площадь, экспериментально подтверждается.

Вывод формул для нахождения силы и коэффициента поверхностного натяжения

Молекулы на всех участках поверхностного слоя жидкости находятся в одинаковых условиях, и два участка одинаковой площади обладают одинаковой поверхностной энергией. Следовательно, избыточная потенциальная энергия U_n поверхностных молекул жидкости прямо пропорциональна поверхности жидкости S . Отношение U_n/S постоянно и равно коэффициенту поверхностного натяжения σ . Таким образом, с энергетической точки зрения, коэффици-

ент поверхностного натяжения – это удельная поверхностная энергия. В СИ поверхностное натяжение выражается в Дж/м², так как 1 Дж = 1 Н·м, то поверхностное натяжение можно выражать в Н/м.



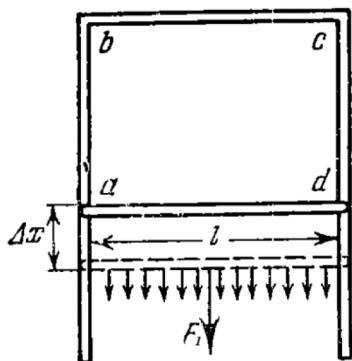
Влияние поверхностной энергии существенно для небольших масс жидкостей (V/S мало), в том числе для тонких жидких плёнок.

Возьмём проволочный каркас $abcd$ с подвижным ребром и окунем его в мыльную воду. При извлечении каркаса из раствора в нём останется натянутой тончайшая мыльная плёнка. Передвинем нижнее подвижное ребро на некоторое расстояние Δx , как это показано пунктиром.

Для равновесия проволоки необходимо, чтобы $\vec{F} = -\vec{F}'$, где \vec{F} – сила поверхностного натяжения, действующая на ребро со стороны одной из поверхностей плёнки. Следовательно, $F_1 = 2F$.

Внешняя сила совершит работу

$$A = F_{1\Delta} x = 2F_{\Delta} x \quad (1)$$



Согласно закону сохранения энергии, эта работа равна изменению энергии плёнки

$$A =_{\Delta} E = U_{n2} - U_{n1} = 2\sigma S_2 - 2\sigma S_1 = 2\sigma (S_2 - S_1)$$

Поскольку $S_2 - S_1 = l_{\Delta} x$, где l – длина подвижной проволоки, то

$$A = 2\sigma l_{\Delta} x. \quad (2)$$

Приравняв правые части выражений (1) и (2), получим

$$2F_{\Delta} x = 2\sigma l_{\Delta} x$$

Отсюда сила поверхностного натяжения, действующая на границу поверхностного слоя длиной l , равна

$$F = \sigma l.$$

Методы измерения поверхностного натяжения

Существующие методы определения поверхностного натяжения делятся на две группы: статические и динамические. Статическими методами определяется поверхностное натяжение практически неподвижных поверхностей, образованных задолго до начала измерений и поэтому находящихся в равновесии с объемом жидкости. Динамические методы основаны на том, что некоторые виды механических воздействий на жидкость сопровождаются периодическими растяжениями и сжатиями ее поверхности, на которые влияет поверхностное натяжение.

Статические методы:

- Метод поднятия в капилляре
- Метод отрыва капли
- Метод Вильгельми
- Метод лежащей капли
- Метод определения по форме висячей капли.

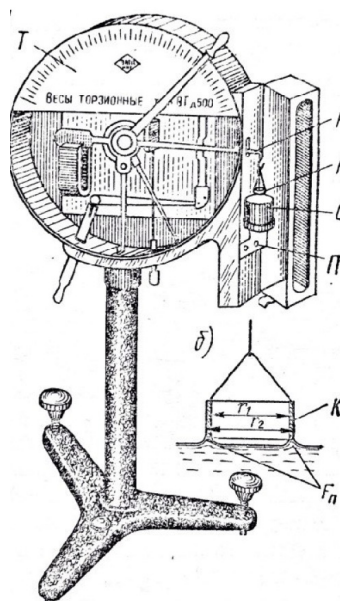
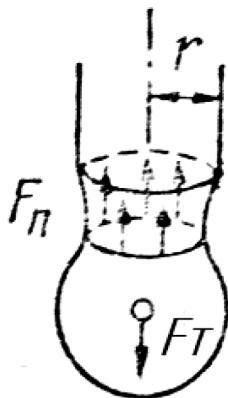
Динамические методы:

- Метод дю Нуи (метод отрыва кольца).
- Сталагмометрический, или метод счёта капель.
- Метод максимального давления пузырька.
- Метод осциллирующей струи.
- Метод стоячих волн.
- Метод бегущих волн.

В случае измерения поверхностного натяжения растворов (особенно полимеров или ПАВ) следует пользоваться статическими методами. Динамические методы могут быть применены для определения равновесного поверхностного натяжения и динамического поверхностного натяжения. Например, для раствора мыла после перемешивания поверхностное натяжение

58 мН/м, а после отстаивания – 35 мН/м. То есть поверхностное натяжение меняется. До установления равновесия оно будет динамическое.

Из показания весов необходимо вычесть вес самого кольца.



Наиболее простой способ определения коэффициента поверхностного натяжения – это **метод отрыва капель**.

Метод основан на том, что при образовании капель жидкости, вытекающей из узкой вертикально расположенной трубки внутреннего радиуса r , отрыв капли происходит при условии, что ее сила тяжести F_T преодолевает силу $F_{\text{п}}$ поверхностного натяжения, действующую по периметру шейки капли. В момент равновесия перед отрывом капли приравнивается внутреннему радиусу r трубки. Отсюда $\sigma = F_T / 2\pi r$. Используемый при этом прибор называется сталагмометром и представляет собой стеклянную трубку с расширением в середине и с узким каналцем на конце. Измерения проводятся сравнительно для дистиллированной воды (72,5 мН/м) и исследуемой жидкости.

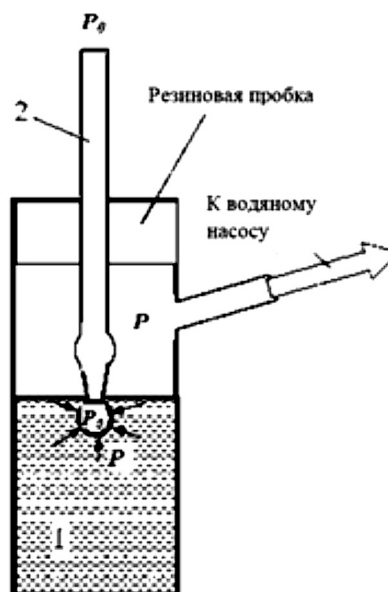
В диагностических целях, например, определяют коэффициент поверхностного натяжения мочи, который в норме составляет 70 мН/м и при наличии в моче желчных пигментов значительно снижается.

Применяют также метод отрыва кольца (метод дю Нуи), который основан на измерении силы $F_{\text{п}}$, необходимой для отрыва тонкого кольца K , касающегося торцом поверхности жидкости и удерживающегося силой поверхностного натяжения, действующей по внешнему (радиусу r_2) и внутреннему (радиусу r_1) периметрам кольца K : $F_{\text{п}} = 2\pi\sigma(r_1 + r_2)$, откуда $\sigma = F_{\text{п}} / 2\pi(r_1 + r_2)$. Определение силы $F_{\text{п}}$ удобно делать с помощью торзионных весов T , к рычажку P которых подвешено кольцо K , а жидкость находится в стаканчике C на подставке Π .

Метод Ребиндера (метод определения максимального давления в пузырьке).

В исследуемую жидкость 1, находящуюся в сосуде, вертикально опускается капиллярная трубка 2, узкий конец которой диаметром не более 0,5 мм касается мениска исследуемой жидкости.

Другим концом эта трубка сообщается с атмосферным воздухом, поэтому внутри капилляра поддерживается атмосферное давление p_0 .



Давление p над исследуемой жидкостью постепенно уменьшают с помощью водяного насоса. Разность давлений ($p_0 - p$) стремится выдуть пузырек воздуха из капилляра в жидкость, но этому противодействует добавочное давление

$$\Delta p = 2\sigma/r,$$

создаваемое силами поверхностного натяжения жидкости в образующемся пузырьке радиуса r и направленное к центру пузырька.

Наконец, при некоторой разности давлений ($p_0 - p$) из капиллярной трубки выдувается в жидкость воздушный пузырек. Разность давлений ($p_0 - p$), максимальная в этот момент, измеряется U-образным манометром и равна ρgh , где ρ – плотность жидкости в манометре, h – разность ее уровней. Таким образом, в момент выдувания пузырька имеет место равенство:

$$\rho gh = 2\sigma/r. \quad (1)$$

Здесь неизвестен радиус r выдуваемого пузырька, измерить который крайне затруднительно. Поэтому прибегают к использованию эталонной жидкости, коэффициент поверхностного натяжения σ_0 которой известен и близок к коэффициенту поверхностного натяжения σ исследуемой жидкости. При этом полагают, что радиусы пузырьков, выдуваемых из одного и того же капилляра, в обоих случаях будут одинаковы.

Теперь вместо исследуемой жидкости в сосуд наливают эталонную жидкость и измеряют по манометру максимальную разность уровней h_0 , при которой пузырек воздуха выдувается в эталонной жидкости и выполняется равенство:

$$\rho gh_0 = 2\sigma_0/r. \quad (2)$$

Разделив уравнение (1) на (2) и решив относительно σ , получаем формулу для вычисления поверхностного натяжения исследуемой жидкости:

$$\sigma = \sigma_0 h/h_0$$

Рассмотренным методом можно определять поверхностное натяжение и на границе раздела двух несмешивающихся жидкостей. В этом случае узкий конец капиллярной трубки должен касаться поверхности раздела этих жидкостей, но при этом следует обязательно учитывать гидростатическое давление $\rho_1 gH$ жидкости, расположенной сверху, толщина слоя которой равна H , а плотность – ρ_1 .

Промежуточный вывод: существует множество методов определения коэффициента поверхностного натяжения жидкостей. Некоторые из них удобнее использовать на производстве, другие в лаборатории. Одним из наиболее простых и доступных считается метод определения поверхностного натяжения при помощи динамометра типа ДПН.

Список литературы

1. Мякишев Г.Я., Сияков А.З. Молекулярная физика. Термодинамика. – М.: Дрофа, 2011.
2. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. – М.: Наука, 1985.
3. Ливенцев Н.М. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1978.
4. Первое сентября. – <http://www.fizportal.ru/>.
5. Википедия – свободная энциклопедия. – <https://www.wikipedia.org/>.
6. Видеоуроки по предметам школьной программы. – <https://interneturok.ru/>.
7. Открытая физика. – <http://physics.ru/>.