

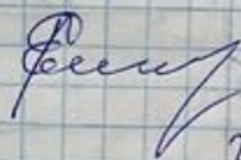
1-7

Протокол  
по лабораторній роботі  
Поверхностне натягнення в  
жидкості

Виконав  
Слов'як ІЗД

Група: 61.51

Перевірив:

  $\alpha = 0,9$

22.01.2025



| $N$ | $D, \text{mm}$ | $(D - \bar{D}), \text{mm}$ | $(D - \bar{D})^2, \text{mm}^2$ | $d, \text{mm}$ | $(d - \bar{d}), \text{mm}$ | $(d - \bar{d})^2, \text{mm}^2$ |
|-----|----------------|----------------------------|--------------------------------|----------------|----------------------------|--------------------------------|
| 1   | 60             | 0,0235                     |                                | 2              |                            |                                |
| 2   | 60,5           | 0,0235                     |                                | 2              |                            |                                |
| 3   | 60,3           | 0,0235                     |                                | 2,1            |                            |                                |
| 4   | 60,2           |                            |                                | 2,1            |                            |                                |
| 5   | 59,3           |                            |                                | 2              |                            |                                |
| 6   | 60,4           |                            |                                | 2              |                            |                                |

$$\bar{D} = 60,11$$

| $N$         | $F, H$ | $(F - \bar{F}), H$ | $(F - \bar{F})^2, H^2$ |
|-------------|--------|--------------------|------------------------|
| 1           | 0,0235 |                    |                        |
| 2           | 0,0235 |                    |                        |
| 3           | 0,0239 |                    |                        |
| 4           | 0,0241 |                    |                        |
| 5           | 0,0221 |                    |                        |
| 6           | 0,0235 |                    |                        |
| $\bar{F} =$ |        | $\Sigma =$         |                        |



**Цель работы**  
Измерение коэффициента поверхностного натяжения воды. Изучение зависимости коэффициента поверхностного натяжения воды от температуры.

**Общие сведения**  
Существует огромный спектр процессов, охватывающих диапазон от природных явлений до промышленного производства, в которых присутствие границы раздела между фазами играет фундаментальную роль. Поверхностное натяжение является одним из наиболее удивительных проявлений сил, действующих между молекулами, и эту связь между силой взаимодействия молекул и поверхностным натяжением угадывали ещё ученые XVIII в.

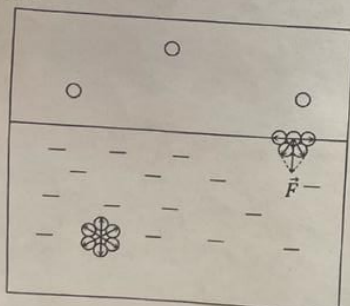


Рис. 1

Молекулы в жидкости расположены на очень близких расстояниях друг от друга, в отличие от газа, поэтому в жидкости силы притяжения между молекулами весьма значительны. Молекулярное движение частиц жидкости — это, в основном, колебательное движение около среднего положения. Поступательное движение ограничивается обменом местами с соседними частицами. На поверхности же раздела жидкости и её насыщенного пара возникают силы, обусловленные различным межмолекулярным взаимодействием граничащих сред: прежде всего водородными связями и более слабыми неполярными взаимодействиями.

Молекулы внутри жидкости окружены со всех сторон такими же молекулами (см. рис. 1), поэтому силы притяжения со стороны соседей скомпенсированы. Векторная сумма сил притяжения со стороны соседей равна 0 — молекула находится в равновесии. Однако у молекул, расположенных близко к поверхности в тонком поверхностном слое, такие силы притяжения не скомпенсированы, поскольку молекулы на границе раздела взаимодействуют только с молекулами воды, а силы взаимодействия с молекулами насыщенного пара пренебрежимо малы. Результирующая сила направлена внутрь жидкости. Из-за этого молекулы стремятся перейти внутрь жидкости и при этом поверхность жидкости уменьшается.

**Цель работы**  
Измерение коэффициента поверхностного натяжения воды. Изучение зависимости коэффициента поверхностного натяжения воды от температуры.

**Общие сведения**  
Существует огромный спектр процессов, охватывающих диапазон от природных явлений до промышленного производства, в которых присутствие границы раздела между фазами играет фундаментальную роль. Поверхностное натяжение является одним из наиболее удивительных проявлений сил, действующих между молекулами, и эту связь между силой взаимодействия молекул и поверхностным натяжением угадывали ещё ученые XVIII в.

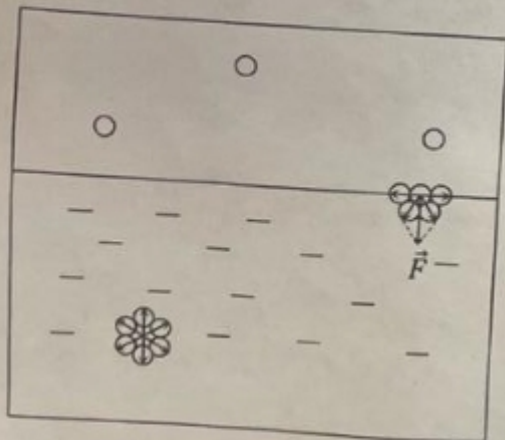


Рис. 1

Молекулы в жидкости расположены на очень близких расстояниях друг от друга, в отличие от газа, поэтому в жидкости силы притяжения между молекулами весьма значительны. Молекулярное движение частиц жидкости — это, в основном, колебательное движение около среднего положения. Поступательное движение ограничивается обменом местами с соседними частицами. На поверхности же раздела жидкости и её насыщенного пара возникают силы, обусловленные различным межмолекулярным взаимодействием граничащих сред: прежде всего водородными связями и более слабыми неполярными взаимодействиями.

Молекулы внутри жидкости окружены со всех сторон такими же молекулами (см. рис. 1), поэтому силы притяжения со стороны соседей скомпенсированы. Векторная сумма сил притяжения со стороны соседей равна 0 — молекула находится в равновесии. Однако у молекул, расположенных близко к поверхности в тонком поверхностном слое, такие силы притяжения не скомпенсированы, поскольку молекулы на границе раздела взаимодействуют только с молекулами воды, а силы взаимодействия с молекулами насыщенного пара пренебрежимо малы. Результирующая сила направлена внутрь жидкости. Из-за этого молекулы стремятся перейти внутрь жидкости и при этом поверхность жидкости уменьшается.



6  
 $H(F - \hat{F})^2$   
Это приводит к тому, что энергия молекул в поверхностном слое отлична от энергии молекул внутри жидкости.

Поверхностная энергия — это избыток энергии поверхностного слоя на границе раздела фаз (по сравнению с энергией вещества внутри тела), обусловленный различием межмолекулярных взаимодействий в обоих веществах.

Очевидно, что поверхностная энергия  $E_{\text{пов}}$  прямо пропорциональна площади  $S$  поверхности раздела:  $E_{\text{пов}} = \sigma S$ . Коэффициент  $\sigma$  называется коэффициентом поверхностного натяжения и зависит от природы соприкасающихся сред и от их состояния.

Из механики известно, что силы всегда действуют так, чтобы привести тело в состояние с наименьшей энергией. В частности и поверхностная энергия  $E_{\text{пов}}$  стремится принять наименьшее возможное значение. Именно с этим связано стремление капель жидкости (или пузырьков газа) принять сферическую форму: при заданном объёме шар обладает наименьшей из всех фигур поверхностью. Этому стремлению противодействует влияние сил тяжести, но для маленьких капель, это влияние слабо и их форма близка к сферической.

При этом молекулы поверхностного слоя вытягиваются внутрь жидкости. Для перемещения молекул из жидкости на её поверхность требуется совершить работу  $A$ , по модулю равную

поверхностной энергии, то есть  $A = E_{\text{пов}} = \sigma S$ . Отсюда следует определение коэффициента поверхностного натяжения.

Коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  равен работе  $A$ , необходимой для образования поверхности площадью  $S$  при постоянной температуре:  $\sigma = \frac{A}{S}$ .

Поверхностное натяжение может быть определено не только энергетически. Поверхностное натяжение проявляет себя как сила в следующем простом примере. Представим себе плёнку жидкости (например, мыльную плёнку), натянутую на квадратную проволочную рамку со стороной  $L$ . Благодаря стремлению поверхности уменьшиться, на проволоку будет действовать сила, которую можно непосредственно измерить. При постоянной силе  $F$  работа равна  $A = FL$ . Тогда:

$$\sigma = \frac{A}{S} = \frac{FL}{L^2} = \frac{F}{L}. \quad (1)$$

Таким образом, на линию, ограничивающую поверхность тела, действуют силы, направленные перпендикулярно этой линии по касательной к поверхности, внутрь неё, стремясь сократить её до минимального размера.

Отсюда следует второе определение: коэффициент поверхностного натяжения равен силе поверхностного натяжения, приходящейся на единицу



длины любого контура, расположенного на поверхности жидкости.

В системе СИ коэффициент поверхностного натяжения измеряется в ньютонах на метр (Н/м).

Силы поверхностного натяжения никак не изменяются по мере сокращения площади поверхности плёнки, так как плотность жидкости, а, следовательно, и среднее расстояние между молекулами на поверхности не изменяется.

Растворённые в жидкости вещества способны как понижать, так и несколько повышать поверхностное натяжение. Вещества, понижающие поверхностное натяжение жидкости, называют поверхностно-активными (ПАВ). ПАВ обладают меньшей полярностью, чем молекулы воды, поэтому энергия их межмолекулярных взаимодействий меньше, чем у молекул воды. Из-за этого на поверхностные молекулы ПАВ действует значительно меньшая втягивающая сила, чем на молекулы воды. Примерами ПАВ в быту могут служить мыло и стиральные порошки.

Общее количество вещества, которое вообще может закрепиться (адсорбироваться) на поверхности жидкости, очень мало. Поэтому даже ничтожные примеси ПАВ, скапливаясь на поверхности жидкости, могут существенно изменить её поверхностное натяжение. Таким образом, небольшие добавки мыла могут уменьшить поверхностное натяжение воды более чем в 3 раза.

С ростом температуры поверхностное натяжение также уменьшается и обращается в ноль при достижении критической точки. Это связано с:

1) усилением теплового движения молекул, что ведёт к ослаблению межмолекулярного взаимодействия, и, как следствие, уменьшению поверхностного натяжения.

2) увеличением количества насыщенного пара над границей раздела, что увеличивает концентрацию молекул в газовой фазе и, следовательно, ведёт к уменьшению нескомпенсированных сил на поверхности раздела фаз и уменьшению поверхностного натяжения.

При достижении критической температуры  $T_{кр}$  исчезает граница раздела фаз между жидкостью и паром, а коэффициент поверхностного натяжения становится равным нулю.

### Описание лабораторного оборудования

Измерение силы поверхностного натяжения жидкости осуществляется методом отрыва кольца. Лабораторная установка (рис. 2) представляет собой конструкцию настольного типа, состоящую из следующих узлов:

- основание на регулируемых опорах;
- электронный динамометр, закрепленный кронштейнами между 2-мя стойками и способный перемещаться в вертикальной плоскости;

- чувствительный элемент электронного динамометра в виде тензометрического датчика силы;
- лабораторный столик;
- измерительное кольцо;
- ёмкость с исследуемой жидкостью;
- уровень;
- термометр.

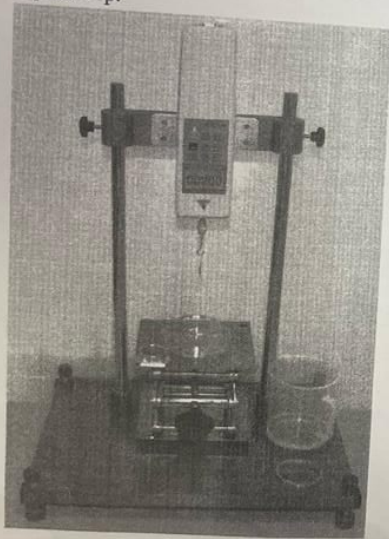


Рис. 2.

### Метод измерения

Метод измерения коэффициента поверхностного натяжения с помощью отрыва кольца основан на определении величины внешних сил, противодействующих силам поверхностного натяжения. Если кольцо погрузить в исследуемую жидкость, то за счёт возникающего межмолекулярного притяжения, жидкость «прилипнет» к кольцу (с внутренней и внешней стороны). При извлечении кольца из жидкости, силы поверхностного натяжения будут увлекать жидкость вслед за кольцом, а в момент отрыва кольца внешние силы будут в точности равняться силам поверхностного натяжения жидкости. Измерив эти силы (например, при помощи электронного динамометра), можно определить коэффициент поверхностного натяжения.

Приведем металлическое кольцо диаметром  $D$  и толщиной  $d$  в соприкосновение с жидкостью (Рис. 3), а затем начинаем опускать ёмкость с жидкостью.

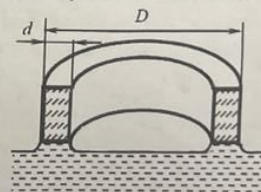


Рис. 3



Если кольцо зафиксировано, то благодаря силам поверхностного натяжения, оно не сразу оторвется от жидкости, но, по мере опускания ёмкости, соприкасающаяся поверхность жидкости будет растягиваться до тех пор, пока сила противодействия не сравняется с силой поверхностного натяжения жидкости. В момент отрыва кольца сила противодействия  $F$  будет определяться условием:

$$F = F_1 + F_2$$

где  $F_1$  — сила, с которой внешняя поверхность пленки тянет кольцо вниз, на основании формулы (1) она равна

$$F_1 = \sigma L = \sigma \pi D, \quad (2)$$

а  $F_2$  — сила, с которой внутренняя поверхность пленки тянет кольцо вниз

$$F_2 = \sigma \pi (D - 2d). \quad (3)$$

Окончательное выражение для силы противодействия будет иметь вид:

$$F = \sigma \pi D + \sigma \pi (D - 2d) \quad (4)$$

Из выражения (4) получаем формулу для расчёта коэффициента поверхностного натяжения жидкости:

$$\sigma = \frac{F}{2\pi(D - d)} \quad (5)$$

Следовательно, для определения коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  нужно измерить силу, которую необходимо приложить к кольцу для её отрыва от поверхности жидкости, и размеры кольца.

### Порядок выполнения лабораторной работы

1. Прочитать и изучить теоретические сведения.
2. Выставить по уровню основание и лабораторный столик.
3. Измерить линейкой (штангенциркулем) размеры кольца: внешний диаметр  $D$  и толщину кольца  $d$ . Измерения провести 6 раз в различных точках кольца. Результаты измерения занести в таблицу 1.

Таблица 1

| № | $D$ , мм    | $(D - \bar{D})$ ,<br>мм | $(D - \bar{D})^2$ ,<br>мм <sup>2</sup> | $d$ ,<br>мм | $(d - \bar{d})$ ,<br>мм | $(d - \bar{d})^2$ ,<br>мм <sup>2</sup> |
|---|-------------|-------------------------|----------------------------------------|-------------|-------------------------|----------------------------------------|
|   |             |                         |                                        |             |                         |                                        |
|   |             |                         |                                        |             |                         |                                        |
|   |             |                         |                                        |             |                         |                                        |
|   |             |                         |                                        |             |                         |                                        |
|   |             |                         |                                        |             |                         |                                        |
|   | $\bar{D} =$ |                         | $\Sigma =$                             | $\bar{d} =$ |                         | $\Sigma =$                             |

4. Рассчитать средние значения этих величин и их погрешности.
5. Опустить столик винтовым механизмом в нижнее положение.
6. Аккуратно подвесить кольцо на крючок динамометра. Включить динамометр кнопкой ON. Обнулить показания динамометра кнопкой ZERO.
7. Поднимая столик с помощью подъёмного механизма, привести нижний край кольца в соприкосновение с жидкостью. Проследить, чтобы нижний край кольца равномерно касался поверхности жидкости, то есть был горизонтальным.



8. Очень медленно отпускать платформу столика, пока кольцо не оторвется от поверхности жидкости.

9. Зафиксировать максимальное показание динамометра в момент отрыва и записать значение силы в таблицу 2. Опыт повторить 6 раз.

Таблица 2

| № | $F, \text{Н}$ | $(F - \bar{F}), \text{Н}$ | $(F - \bar{F})^2, \text{Н}^2$ |
|---|---------------|---------------------------|-------------------------------|
|   |               |                           |                               |
|   |               |                           |                               |
|   |               |                           |                               |
|   |               |                           |                               |
|   | $\bar{F} =$   |                           | $\Sigma =$                    |

10. Рассчитать среднее значение силы и её погрешности

11. По формуле (5) найти коэффициент поверхностного натяжения воды.

12. Рассчитать его косвенную погрешность  $\Delta\sigma$ .

13. Сравнить с табличным значением при  $20^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_{\text{т}} = 0,073 \text{ Н/м}$ .

14. Налить горячую ( $\sim 70^\circ\text{C}$ ) воду в ёмкость. Провести измерения коэффициента поверхностного натяжения при различных температурах по мере остывания горячей воды (или разбавляя её холодной водой), измеряя её температуру термометром. Для каждой температуры рассчитать один коэффициент поверхностного натяжения. Измерения провести для 6 температур. Результаты записать в таблицу 3.

15. Выключить динамометр кнопкой OFF.

Таблица 3

| № | $F, \text{Н}$ | $T, ^\circ\text{C}$ | $\sigma, \text{Н/м}$ |
|---|---------------|---------------------|----------------------|
|   |               |                     |                      |
|   |               |                     |                      |
|   |               |                     |                      |
|   |               |                     |                      |
|   |               |                     |                      |

15. Построить график зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры.

### Контрольные вопросы

1. Что такое сила поверхностного натяжения?
2. Как определяется коэффициент поверхностного натяжения при динамическом и энергетическом рассмотрении этого явления?
3. Как зависит коэффициент поверхностного натяжения от температуры и наличия примесей.
4. Объяснить смысл метода отрыва кольца.

### Литература

1. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика. СПб Лань, 2008. 480 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3 т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. 13-е изд., стер. СПб. Лань, 2017. 436 с.



8. Очень медленно отпускать платформу столика, пока кольцо не оторвется от поверхности жидкости.

9. Зафиксировать максимальное показание динамометра в момент отрыва и записать значение силы в таблицу 2. Опыт повторить 6 раз.

Таблица 2

| № | $F, \text{Н}$ | $(F - \bar{F}), \text{Н}$ | $(F - \bar{F})^2, \text{Н}^2$ |
|---|---------------|---------------------------|-------------------------------|
|   |               |                           |                               |
|   |               |                           |                               |
|   |               |                           |                               |
|   |               |                           |                               |
|   | $\bar{F} =$   |                           | $\Sigma =$                    |

10. Рассчитать среднее значение силы и её погрешности

11. По формуле (5) найти коэффициент поверхностного натяжения воды.

12. Рассчитать его косвенную погрешность  $\Delta\sigma$ .

13. Сравнить с табличным значением при  $20^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_t = 0,073 \text{ Н/м}$ .

14. Налить горячую ( $\sim 70^\circ\text{C}$ ) воду в ёмкость. Провести измерения коэффициента поверхностного натяжения при различных температурах по мере остывания горячей воды (или разбавляя её холодной водой), измеряя её температуру термометром. Для каждой температуры рассчитать один коэффициент поверхностного натяжения. Измерения провести для 6 температур. Результаты записать в таблицу 3.

15. Выключить динамометр кнопкой OFF.

Таблица 3

| № | $F, \text{Н}$ | $T, ^\circ\text{C}$ | $\sigma, \text{Н/м}$ |
|---|---------------|---------------------|----------------------|
|   |               |                     |                      |
|   |               |                     |                      |
|   |               |                     |                      |
|   |               |                     |                      |
|   |               |                     |                      |

15. Построить график зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры.

### Контрольные вопросы

1. Что такое сила поверхностного натяжения?
2. Как определяется коэффициент поверхностного натяжения при динамическом и энергетическом рассмотрении этого явления?
3. Как зависит коэффициент поверхностного натяжения от температуры и наличия примесей.
4. Объяснить смысл метода отрыва кольца.

### Литература

1. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика. СПб Лань, 2008. 480 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3 т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. 13 е изд., стер. СПб. Лань, 2017. 436 с.