

# РАБОТА 3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ВОДЫ МЕТОДОМ КАПИЛЛЯРНЫХ ТРУБОК

**Цель работы:** Измерить коэффициент поверхностного натяжения воды методом капиллярных трубок и исследовать зависимость его от температуры.

### Введение

Молекулы, расположенные вблизи поверхности раздела сред в слое толщиной, равной радиусу молекулярного действия, находятся в условиях, отличных от условий внутри тел. На каждую молекулу в поверхностном слое жидкости будет действовать со стороны молекул, находящихся внутри жидкости, сила, направленная внутрь жидкости. Такие молекулы обладают дополнительной энергией. Разность между энергией всех молекул поверхностного слоя (обеих сред) и той энергией, которую они имели бы внутри тел, называется поверхностной энергией. Коэффициент пропорциональности между поверхностной энергией  $U_{\text{пов}}$  и площадью поверхности  $S$  называется *коэффициентом поверхностного натяжения*  $\sigma$ :

$$U_{\text{пов}} = \sigma S. \quad (3.1)$$

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

Любая замкнутая система переходит со временем в состояние, соответствующее минимуму потенциальной энергии, под действием сил, связанных с этой энергией, соотношением

$$F_x = -\frac{dU_{\text{пов}}}{dx} = -\sigma \frac{dS}{dx}, \quad (3.2)$$

где  $x$  – координата вдоль оси, направленной по касательной к поверхности жидкости. Эти силы называются силами поверхностного натяжения. Они направлены так, чтобы препятствовать увеличению площади поверхности. Под действием этих сил жидкость в условиях невесомости принимает форму шарообразной капли. Если приращение площади  $dS$  представить себе в виде прямоугольника с фиксированной длиной  $l$  и увеличивающейся шириной  $dx$ , то из (3.2) получим, что модуль силы поверхностного натяжения, действующей на некоторый отрезок  $l$ , ограничивающий поверхность жидкости, можно определить как

$$F = \sigma l. \quad (3.3)$$

При этом сила направлена по касательной к поверхности и перпендикулярно данному отрезку, а знак «минус» у проекции силы показывает, что она действует внутрь поверхности.

На границе раздела одновременно трех сред – твердой, жидкой и газообразной – происходит искривление поверхности жидкости из-за явления смачивания или несмачивания материала сосуда, в котором она находится. Самой распространенной тройкой для наблюдения связанных с этим явлений служит стекло, вода и воздух. Известно, что водяной пар притягивается сильнее молекулами стекла, чем молекулами на поверхности воды, и даже ненасыщенный, конденсируясь, образует на стекле тончайшую водяную пленку толщиной порядка  $10^{-6}$  см, которая плавно переходит в поверхность раздела воды и воздуха. Это явление называется абсолютным смачиванием, когда угол (см. рис.3.1) между поверхностью жидкости и твердой стенкой (краевой угол  $\theta$ ) стремится



Рис.3.1

к  $0^\circ$ . Противоположная ситуация, когда молекулы пара сильнее притягиваются к своей жидкости, чем к твердому телу, называется несмачиванием. Например, краевой угол ртути на стекле составляет  $150^\circ$ , воды на парафине – около  $105^\circ$ .

При учете сил поверхностного натяжения давления в соприкасающихся средах становятся различными. Например, стремление жидкой капли, находящейся в воздухе, сократить свою поверхность приводит к сжатию капли. Давление жидкости в капле оказывается, таким образом, больше давления окружающего воздуха. Такая же ситуация имеет место при несмачивании. Наоборот, при смачивании, когда мениск жидкости имеет вогнутую форму, давление внутри жидкости становится меньше атмосферного. Разность между ними называется поверхностным давлением  $p_{\text{пов}}$ .

Для вычисления величины  $p_{\text{пов}}$  приравняем изменение поверхностной энергии при изменении площади поверхности на  $dS$  к работе жидкости против сил поверхностного давления по увеличению объема на  $dV$ :

$$\sigma dS = p_{\text{пов}} dV \quad (3.4)$$

Конкретный вид поверхностного давления зависит от формы изогнутой поверхности, которая в свою очередь определяется формой стенки сосуда.

Например, в тонкой трубке круглого сечения (круглом капилляре) свободная поверхность жидкости приобретет сферическую форму некоторого радиуса  $R \geq r$ , где  $r$  – радиус капилляра. Так как для сферы  $S = 4\pi R^2$ ;  $V = 4/3 \pi R^3$ , то из (3.4) получаем

$$p_{\text{сф}} = \sigma (dS/dV) = 2\sigma/R \quad (3.5)$$

Если жидкостью заполнить пространство между двумя широкими пластинами, расположенными параллельно друг другу на малом расстоянии  $d$ , то свободная поверхность жидкости приобретет цилиндрическую форму некоторого радиуса  $R \geq d$ . Так как для цилиндра высотой  $h$   $S = 2\pi Rh$ ;  $V = \pi R^2 h$ , то из (3.4) получаем

$$p_{\text{цил}} = \sigma (dS/dV) = \sigma/R \quad (3.6)$$

Наличием поверхностного давления обусловлены так называемые капиллярные явления, при которых в сообщающихся сосудах однородная жидкость находится на разных уровнях при равенстве давлений в широком и узком сосуде.

### Методика выполнения работы

Если погрузить узкую стеклянную трубку в чашу с водой, то свободная поверхность жидкости будет искривлена за счет явления смачивания (рис. 3.2). Из-за уменьшения

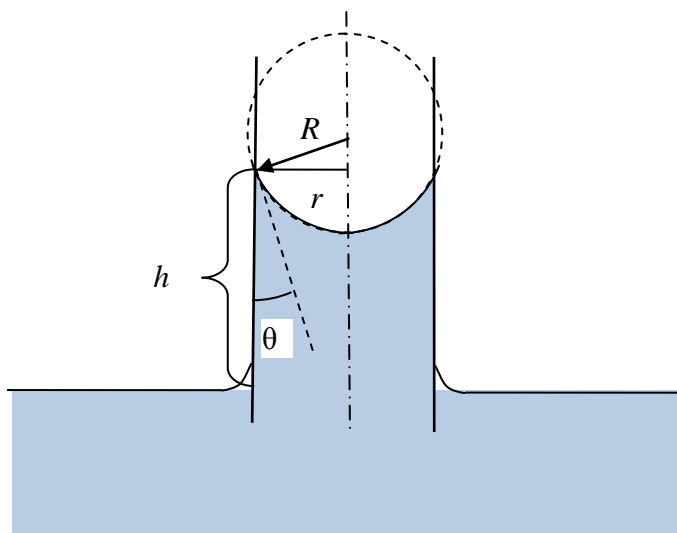


Рис.3.2

давления воды в трубке по сравнению с атмосферным давлением на величину (3.5), вода поднимется в капилляре на такую высоту  $h$ , которая обеспечит равновесие в сообщающихся сосудах за счет гидростатического давления. Таким образом,  $\rho gh = \frac{2\sigma}{R}$ .

Как видно из рис. 3.2, радиус кривизны мениска  $R$  связан с радиусом капилляра  $r$  соотношением  $r = R \cos \theta$ , откуда получаем высоту подъема воды в круглом капилляре:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r} \quad (3.7)$$

При полном смачивании краевой угол  $\theta = 0$ . Однако ситуация полного смачивания возможна только при идеально чистых поверхностях капилляра и отсутствии примесей в воде. Для устранения систематической погрешности, связанной с определением уровня воды в открытой части сосуда, в работе используются одновременно два капилляра различных радиусов  $r_1$  и  $r_2$  и определяется разность высот столбиков воды в них.

Применив выражение (3.7) для двух капилляров разного сечения, найдем коэффициент поверхностного натяжения воды в предположении абсолютного смачивания по формуле

$$\sigma_{\text{эксп}} = \frac{r_1 r_2 (h_2 - h_1)}{2(r_1 - r_2)} \rho g . \quad (3.8)$$

Оценить краевой угол можно по формуле

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{\text{эксп}}}{\sigma_{\text{табл}}} , \quad (3.9)$$

где  $\sigma_{\text{табл}}$  – табличное значение коэффициента поверхностного натяжения.

Если опустить капиллярную трубку с внутренним радиусом  $r$  достаточно глубоко в воду, а затем аккуратно вынуть её, то часть жидкости вытечет, внизу трубки образуется выпуклый мениск, и оставшийся в капилляре столбик воды будет длиннее, чем величина в формуле (3.7). Это объясняется тем, что поверхностное натяжение в обоих менисках будет действовать на жидкость вверх. Следует учесть, что в образовании нижнего мениска участвует внешняя поверхность трубки, которая имеет радиус  $r_0$ , причем  $r_0 > r$ . Тогда равновесие оставшегося в трубке столба жидкости достигается в предположении

абсолютного смачивания при условии  $\rho g h = \frac{2\sigma}{r} + \frac{2\sigma}{r_0}$ . По длине столбика  $h$  оставшейся

после вытекания воды также можно определить коэффициент поверхностного натяжения по формуле

$$\sigma_{\text{эксп}} = \frac{r h}{2} \rho g \frac{r_0}{r_0 + r} , \quad (3.10)$$

и краевой угол по формуле (3.9).

Формулу (3.7) можно также использовать для определения диаметра капилляров в пористом теле по высоте подъёма жидкости в нем при известном коэффициенте поверхностного натяжения.

## Порядок выполнения работы

Заполните таблицу приборов и принадлежностей.

Таблица 3.1

Приборы и принадлежности	Технические характеристики
Сосуд с водой	
Нагреватель (чайник электрический)	
Капилляры с известными диаметрами	
Линейка-шкала	
Держатель капилляров на штативе	
Термометр для жидкостей	
Фильтровальная бумага	

**Задание 1.** Измерение коэффициента поверхностного натяжения воды по разности высот подъёма жидкости в капиллярных трубках.

1. Установите вертикально капиллярные трубки в общем держателе и погрузите их в сосуд с дистиллированной водой, опустив их на 2 – 3 см ниже поверхности жидкости. Оставьте их в этом положении на несколько минут для основательного смачивания водой. Проследите, чтобы в капиллярах не осталось пузырьков воздуха.

2. Отсчитайте с помощью линейки-шкалы высоты уровней воды в капиллярах.

3. Приподнимите трубки над поверхностью, выдуйте из них воду и снова опустите на некоторую глубину.

4. Повторите измерения не менее трех раз. Результаты измерений запишите в табл. 3.2.

Таблица 3.2

№ опыта	$r_1 =$	$r_2 =$	$h_2 - h_1, мм$	$\sigma_{эксп}, Н/м$
	$h_1, мм$	$h_2, мм$		
1				/
2				
3				
Среднее значение $\pm$ погрешность	/	/		

5. Вычислите среднее значение разности высот и его случайную погрешность  $\Delta h$ . Сравните случайную погрешность с приборной и возьмите наибольшую из них. По формуле (3.8), основываясь на среднем значении разности высот, вычислите  $\sigma_{\text{усп}}$ .

6. Оцените погрешность  $\Delta\sigma$  по формуле

$$\Delta\sigma = \sigma \sqrt{\left(\frac{\Delta r}{r_2 - r_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h_2 - h_1}\right)^2}, \quad (3.11)$$

где  $\Delta r = \sqrt{(\Delta r_1)^2 + (\Delta r_2)^2}$  - погрешность радиусов капиллярных трубок.

7. Сравните измеренное значение с табличным. Определите по формуле (3.9) краевой угол смачивания и его погрешность.

**Задание 2.** Измерение коэффициента поверхностного натяжения воды по высоте столба жидкости, удерживаемой в вертикальном капилляре.

1. Выньте один из капилляров из держателя. Опустите его в стакан с водой так, чтобы погруженная часть заведомо превышала высоту столбика в задании 1. Подержите его в таком состоянии несколько минут.
2. Аккуратно выньте капилляр из воды и дождитесь установления уровня.
3. Поднесите капилляр к измерительной линейке и отсчитайте уровни нижней и верхней границ жидкости. Результаты занесите в таблицу 3.3

Таблица 3.3

№ опыта	$r =$ ; $r_0 =$		$h$ , мм	$\sigma_{\text{эксп}}$ , Н/м
	$h_{\text{н}}$ , мм	$h_{\text{в}}$ , мм		
1				/
2				
3				
Среднее значение	/			
$\pm$ погрешность	/			

4. Удалите воду из трубки. Повторите опыт не менее трех раз.
5. Вычислите среднее значение высоты столба и его случайную погрешность. Сравните случайную погрешность с приборной и возьмите наибольшую из них. По формуле (3.10), основываясь на среднем значении высоты, вычислите  $\sigma_{\text{усп}}$ .
6. Оцените погрешность  $\Delta\sigma$  по формуле, аналогичной (3.11).

- Сравните измеренное значение с табличным. Определите по формуле (3.9) краевой угол смачивания и его погрешность.

**Задание 3.** Изучение зависимости коэффициента поверхностного натяжения воды от температуры.

- Измерьте температуру воды в последнем опыте. Запишите в последнюю строку таблицы 3.4. Перенесите в эту строку результаты последнего опыта задания 2.
- Смешайте в сосуде горячую воду из чайника с оставшейся в нем водой до температуры порядка  $60^{\circ}\text{C}$ . Запишите получившуюся температуру в первую строку таблицы 3.4. Проведите измерения, аналогичные заданию 2, при данной температуре воды в стаканчике и заполните первую строку таблицы.
- После остывания воды примерно до  $40^{\circ}\text{C}$  проведите измерения температуры и высоты оставшегося столба жидкости еще раз. Результаты внесите во вторую строку таблицы 3.4.

Таблица 3.4

Температура $T$ , $^{\circ}\text{C}$	$r =$ ; $r_0 =$		$h$ , мм	$\sigma_{\text{эксп}}$ , Н/м
	$h_{\text{н}}$ , мм	$h_{\text{в}}$ , мм		

- Рассчитайте  $\sigma$  по формуле (3.10) для каждой температуры. В качестве погрешности  $\Delta\sigma$  примите величину, полученную в задании 2.
- Постройте график зависимости  $\sigma(T)$ .

**Задание 4.** Определение среднего диаметра капилляров в фильтровальной бумаге.

- Самостоятельно выработайте методику для решения данной экспериментальной задачи.
- Проведите измерения. Определите искомую величину и ее погрешность.
- Напишите заключение к работе.

### Контрольные вопросы

- Чем обусловлено существование сил поверхностного натяжения жидкости?
- Объясните поднятие (или опускание) жидкости в капиллярах.

3. Какого диаметра должны быть капилляры у дерева высотой 10 м?
4. Чем объясняется уменьшение коэффициента поверхностного натяжения с ростом температуры?
5. В каком случае из крана самовара падают более тяжелые капли – когда вода горячая, или когда она остыла?
6. Почему весной необходимо быстро вспахать и заборонить землю?
7. Как будет двигаться в горизонтальном коническом капилляре капля смачивающей жидкости? Капля несмачивающей жидкости? Сделайте рисунок.
8. Оцените силу, с которой за счет поверхностного натяжения притягиваются друг к другу две параллельные стеклянные пластины размером  $1 \times 1 \text{ м}^2$ , между которыми попала вода. Расстояние между пластинами 0,2 мм.
9. На поверхности воды плавают два одинаковых кубика с ребром  $a = 1 \text{ см}$ , изготовленные из смачиваемого водой материала. Один из кубиков натерли парафином. Оцените, какой из кубиков погружен в воду больше и на сколько.
10. Предлагается проект «вечного двигателя». Тонкая смачиваемая водой изогнутая трубка погружена одним концом в широкий сосуд с водой (см. 3.3). Вода поднимается по трубке и стекает обратно в сосуд. Вытекающая из трубки вода может совершать полезную работу. В чем дефект этого проекта?

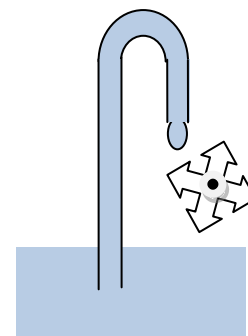


Рис.3.3