

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ
МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ
(компьютерное моделирование)**

В.В.Монахов, А.В.Кожедуб

Цель работы - изучение эффектов смачивания и определение коэффициента поверхностного натяжения воды по поведению воды в стеклянном капилляре.

На рис.1 показано главное окно программы и схема модельной экспериментальной установки. С помощью этой установки находится коэффициент поверхностного натяжения жидкости путём измерения избыточного давления при погружении в жидкость стеклянного капилляра - трубки с малым внутренним диаметром.

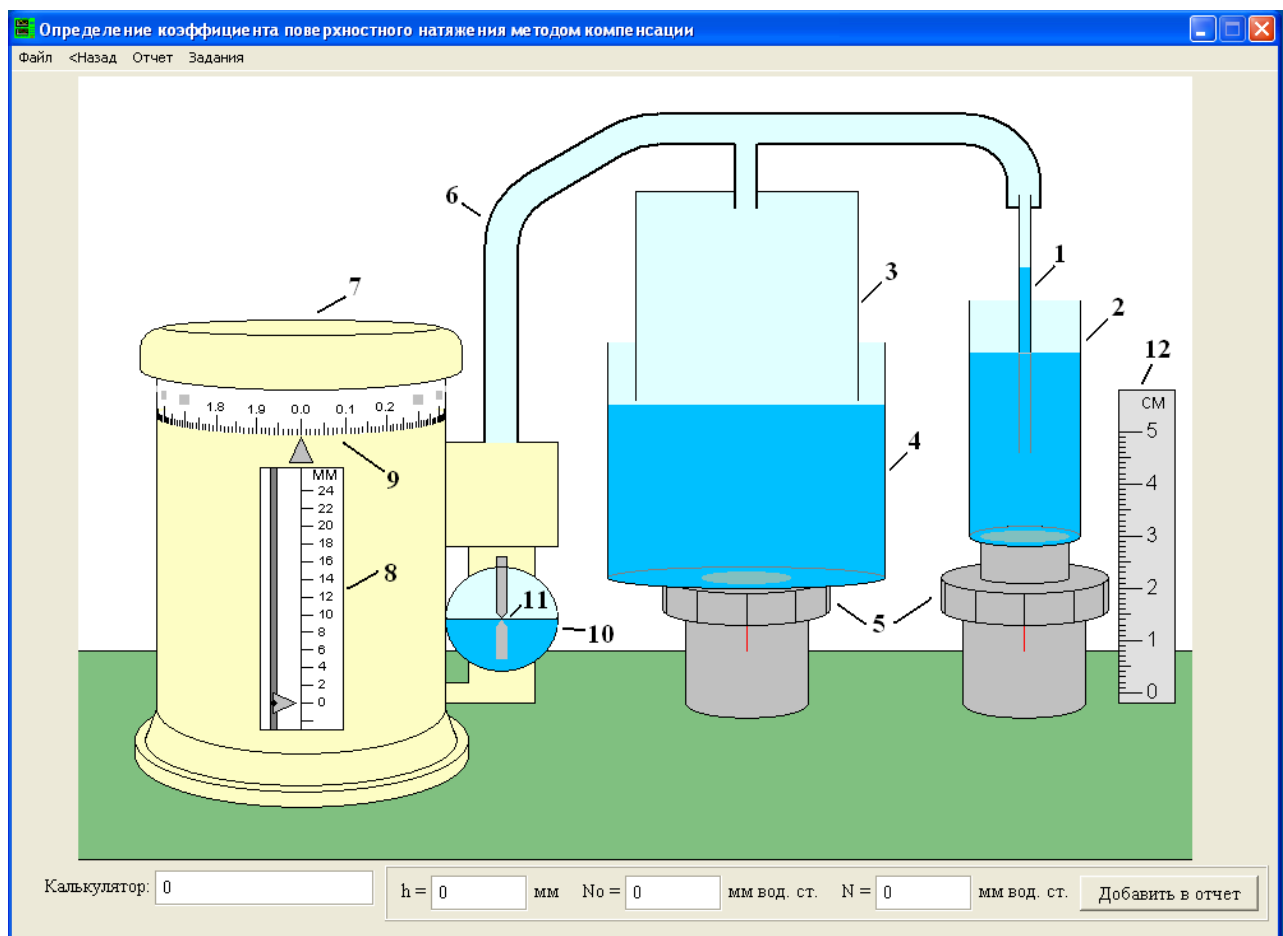


Рис. 1. Главное окно программы и схема экспериментальной установки

1. Теоретические основы работы

В результате межмолекулярного взаимодействия поверхность жидкости стремится минимизировать потенциальную энергию, пропорциональную площади этой поверхности. Из-за этого, если можно пренебречь силами тяжести, жидкость принимает сферическую форму. Такая поверхность создаёт добавочное давление в жидкости, равное

$$P = 2\alpha/R, \quad (1)$$

где R - радиус кривизны поверхности, α - коэффициент поверхностного натяжения.

Величину α можно определить как отношение силы поверхностного натяжения к длине

границы l , вдоль которой она действует, то есть

$$\alpha = F/l. \quad (2)$$

В данной работе коэффициент поверхностного натяжения определяется по поведению жидкости в стеклянном капилляре - трубке с малым внутренним диаметром ($d < 1$ мм). Капилляр опущен в жидкость в вертикальном положении, как изображено на рис. 1.

Картина явления в этом случае зависит от соотношения сил межмолекулярного притяжения f_0 в жидкости и сил взаимодействия между молекулами жидкости и материалом капилляра f_1 . Если $f_1 > f_0$, то поверхность смачиваемая, и жидкость в капилляре поднимается (рис. 2). В противном случае поверхность не смачиваемая, и жидкость опустится (рис. 3).

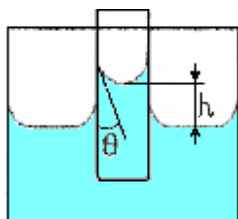


Рис. 2. Подъем жидкости в капилляре (смачиваемая поверхность)

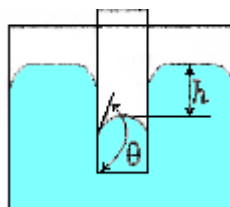


Рис. 3. Опускание жидкости в капилляре (не смачиваемая поверхность)

От соотношения сил f_0 и f_1 зависит также так называемый краевой угол θ на границе поверхности жидкости в капилляре (см. рис. 2 и 3). В предельном случае полного смачивания, когда $f_1 \gg f_0$, имеем $\theta = 0$. В другом крайнем случае, при $f_1 \ll f_0$, получим $\theta = 180^\circ$. Наконец, при $f_1 \approx f_0$ будет $\theta \approx 90^\circ$.

Поверхность жидкости в сосуде практически плоская из-за действия силы тяжести. В капилляре же преобладают силы поверхностного натяжения, поэтому форма поверхности жидкости близка к сферической. В этом случае высоту подъема (опускания) жидкости в капилляре можно связать с радиусом капилляра r и коэффициентом α .

Из гидростатики известно, что давление столба жидкости высотой h определяется соотношением

$$P = \rho gh, \quad (3)$$

где ρ - плотность жидкости; g - ускорение свободного падения. Подставляя в формулу (3) величину P из формулы (1), имеем

$$\rho gh = \frac{2\alpha}{R}. \quad (4)$$

Из геометрии следует, что радиус кривизны поверхности жидкости R связан с радиусом капилляра r соотношением

$$R = \frac{r}{\cos\theta}. \quad (5)$$

Подставив в формулу (4) радиус кривизны поверхности R из формулы (5), можно получить выражение для вычисления высоты h подъема (если $\theta < 90^\circ$) жидкости в капилляре

$$h = \frac{2\alpha \cos\theta}{\rho gh}. \quad (6)$$

Отметим, что стекло почти полностью смачивается водой, поэтому в данной работе можно считать $\cos\theta = 1$. Таким образом, коэффициент поверхностного натяжения воды α можно найти по высоте h подъема жидкости в стеклянном капилляре из соотношения

$$\alpha = \rho g r h / 2. \quad (7)$$

В данной работе коэффициент α находится как по формуле (7), так и непосредственно на основе формулы (1). Пусть над поверхностью воды в капилляре каким-либо способом создается избыточное давление P , препятствующее подъему жидкости. Тогда, согласно (1),

имеем

$$\alpha = PR/2. \quad (8)$$

Учитывая (5) и полагая $\theta = 0$, имеем

$$\alpha = Pr/2. \quad (9)$$

2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка схематически изображена на рис.1. Здесь 1 - капилляр, опущенный в сосуд 2 с водой. Избыточное давление над жидкостью в капилляре создается с помощью колокола 3 и сосуда 4 с водой. Сосуд 4, как и сосуд 2, могут подниматься и закрепляться гайками 5. Посредством соединительной трубки 6 система сообщается с манометром 7.

Манометр позволяет измерить избыточное давление в системе в миллиметрах водяного столба и имеет две шкалы. Вертикальная шкала 8 имеет цену деления 2 мм. вод. ст. Цилиндрическая шкала 9 имеет 200 делений с ценой деления 0,01 в мм. вод. ст., то есть один оборот этой шкалы соответствует одному делению шкалы 8. Отсчет давления по шкалам манометра производится, когда уровень воды в застекленном отсеке 10 проходит по концу острия 11. Для большей точности следует наблюдать изображение острия при отражении его от поверхности воды в отсеке. Отсчет производится, когда концы острия и его изображения соприкасаются (рис. 4).

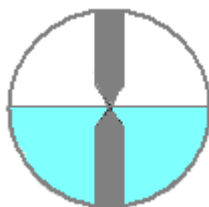


Рис. 4. Правильное положение уровня жидкости

Высота поднятия воды в капилляре измеряется с помощью линейки 12.

3. Порядок выполнения работы

ЧАСТЬ 1. Проведение измерений

1. Радиус капилляра задаётся преподавателем, поэтому его измерять не надо - он добавляется в отчёт автоматически.

2. При полностью опущенном сосуде, над которым находится колокол, измерьте линейкой высоту h подъёма воды в капилляре. Линейку можно перетаскивать с помощью "мыши". Введите измеренное значение в соответствующий пункт ввода.

3. Измерьте начальное показание N_0 манометра. Введите измеренное значение в соответствующий пункт ввода.

Компенсация давления в манометре производится вращением его верхней шкалы, которое выполняется с помощью "мыши" нажатием на шкалу слева или справа от треугольного репера. При этом меняется уровень воды в круглом отсеке, расположенном справа на манометре. Отсчёт производят в момент, когда в этом отсеке остриё и его зеркальное отражение начинают соприкасаться.

4. Поднимите сосуд, над которым находится колокол, и добейтесь совпадения уровней жидкости в капилляре и сосуде, в который опущен этот капилляр.

5. Измерьте показания манометра N в этом состоянии. Введите измеренное значение в соответствующий пункт ввода.

6. Занесите результаты в отчёт.

7. Верните систему в первоначальное состояние, опустив сосуд, над которым находится колокол.

8. Повторите все измерения 5-6 раз.

ЧАСТЬ 2. Проведение расчетов

1. Вычислите коэффициент поверхностного натяжения α по формуле (7):

$$\alpha = \rho g r h / 2,$$

где ρ - плотность воды, g - ускорение свободного падения, r - радиус капилляра.

2. Вычислите коэффициент поверхностного натяжения α по формуле (9):

$$\alpha = P r / 2$$

где $P = P - P_0$ - избыточное давление. (Формула верна в предположении полного смачивания).

ЧАСТЬ 3. Расчет погрешностей

1. Рассчитайте погрешность нахождения коэффициента поверхностного натяжения по формуле (7) и добавьте в отчет.

В этом случае, пренебрегая малыми величинами $\Delta g/g$ и $\Delta \rho/\rho$, имеем

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2}, \quad \Delta \alpha = \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2}.$$

2. Рассчитайте погрешность нахождения коэффициента поверхностного натяжения по формуле (9) и добавьте в отчет.

В этом случае получаем

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2}, \quad \Delta \alpha = \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2},$$

где величина $\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta d}{d}$ задана и включается в отчет автоматически, а $\frac{\Delta P}{P}$ находится по разбросу повторных измерений P .

3. Сохраните отчет, выбрав пункт "Файл | Сохранить отчет" основного меню.

4. Контрольные вопросы

1. Какую форму имеет вода в капилляре? Почему?
2. Почему в данной работе полагают радиус кривизны жидкости в капилляре равным радиусу капилляра?
3. Можно ли было бы делать такое же предположение, если бы в качестве жидкости использовали ртуть?
4. Какая формула должна давать более точное значение коэффициента поверхностного натяжения, (7) или (9)? Почему?