

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ОТРЫВА ГАЗОВОГО ПУЗЫРЯ.

Методические указания к лабораторной работе М-23 по курсу общей физики.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.

Рецензент А.И. Бабакин

Изложены краткие теоретические сведения о поверхностном натяжении жидкости и на основе простейших термодинамических соотношений получены формулы для определения коэффициента поверхностного натяжения по изменению давления при отрыве от капилляра газового пузыря. Приведена схема экспериментальной установки с соответствующими пояснениями, изложен порядок проведения эксперимента и порядок обработки экспериментальных данных. Для студентов младших курсов технических специальностей.

Цель работы - изучение поверхностных явлений в жидкости и экспериментальное определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Молекулы жидкости располагаются настолько близко друг к другу, что между ними возникают значительные силы притяжения. Поскольку взаимодействие быстро уменьшается с увеличением расстояния, начиная с некоторого расстояния силами притяжения между молекулами можно пренебречь. Это расстояние γ называется радиусом молекулярного действия, а сфера радиусом γ сферой молекулярного действия. Радиус молекулярного действия имеет значение порядка нескольких эффективных диаметров молекулы.

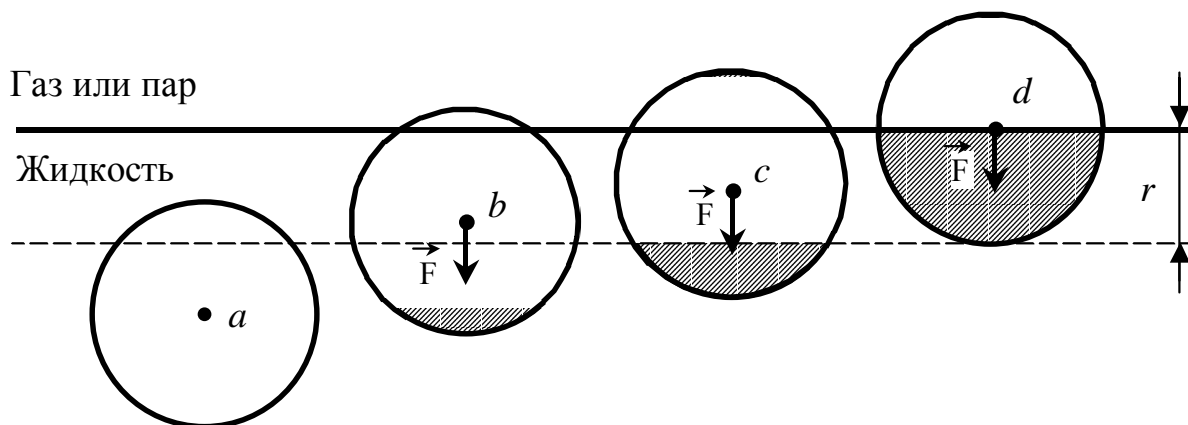


Рис. 1

Каждая молекула испытывает притяжение со стороны всех соседних с ней, находящихся в пределах сферы молекулярного действия, центр которой совпадает с данной. Равнодействующая всех этих сил для каждой молекулы (например, молекулы a на рис. 1), находящейся от поверхности жидкости на расстоянии, превышающем γ , в среднем равна нулю.

Иначе обстоит дело, если молекула находится на меньшем расстоянии от поверхности, чем γ . Так как плотность пара или газа, с которым граничит жидкость, во много раз меньше ее плотности, выступающая за пределы жидкости часть сферы молекулярного действия будет менее заполнена молекулами, чем остальная часть. В результате на каждую молекулу, находящуюся в

поверхностном слое толщиной g , будет действовать сила F , направленная внутрь жидкости. Эта сила тем больше, чем ближе молекула находится к границе слоя, так как в этом случае возрастает разность сил притяжения молекулы жидкости (b , c или d на рис. 1) к молекулам жидкости, находящимся в заштрихованной области (см. рис. 1) сферы молекулярного действия, к молекулам газа или пара в такой же по объему области над поверхностью жидкости.

Переход молекулы из глубины жидкости в поверхностный слой связан с необходимостью совершения работы против действующих в поверхностном слое сил. Эта работа совершается молекулой за счет запаса ее кинетической энергии и идет на увеличение потенциальной энергии молекулы.

Таким образом, молекулы в поверхностном слое обладают дополнительной потенциальной энергией. Поверхностный слой в целом обладает дополнительной энергией, которая является составной частью внутренней энергии жидкости и называется свободной.

Свободная энергия жидкости пропорциональна площади S поверхности, т.е.

$$E_S = \sigma S \quad (1)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Из-за наличия свободной энергии жидкость обнаруживает стремление к сокращению площади своей поверхности. Жидкость ведет себя так, как если бы она была заключена в упругую растянутую пленку, стремящуюся сжаться. Поэтому предоставленная самой себе жидкость будет принимать форму с минимальной площадью поверхности, т.е. форму шара.

Рассмотрим находящийся в равновесии сферический газовый пузырь радиусом R . Из-за наличия у поверхностного слоя свободной энергии E_S на границе раздела жидкой и газообразной фаз возникает скачок давления Δp , который зависит от коэффициента поверхностного натяжения σ и радиуса пузыря R . Будем считать жидкость несжимаемой, а газ - идеальным. Тогда внутренняя энергия контактируемых фаз будет функцией только температуры: $E_1 = E_1(T)$, $E_2 = E_2(T)$. Пусть по каким-либо причинам радиус газового пузыря увеличился на бесконечно малую величину dR . Процесс считаем изотермическим ($T = \text{const}$) и равновесным. Элементарная работа расширяющегося газа, по определению,

$$dA = \Delta p dV$$

По закону сохранения энергии эта работа идет на изменение внутренней энергии системы:

$$dA = dE_S + dE_1 + dE_2$$

Отсюда, учитывая, что $dE_1 = dE_2 = 0$ при $T = \text{const}$, $dE_S = \sigma dS$, $dV = S dR$, $S = 4\pi R^2$, $dS = 8\pi R dR$, получим

$$\sigma 8\pi R dR = \Delta p 4\pi R^2 dR$$

Окончательная формула Лапласа для перепада давления на поверхностном слое пузыря имеет вид

$$\Delta p = 2\sigma/R \quad (2)$$

Формула (2) оказывается справедливой и в общем случае контакта двух сред, только тогда R - радиус кривизны данного участка поверхности раздела, а Δp - скачок давления при переходе через тот же участок поверхности раздела фаз.

Пусть сферический газовый пузырь радиусом R находится в равновесии в жидкости на глубине h под поверхностью. Давление в газовом пузыре

$$p^* = p_0 + \rho_{ж}gh + 2\sigma/R \quad (3)$$

где p_0 - атмосферное давление; $\rho_{ж}gh$ - давление, создаваемое столбом жидкости h ; $2\sigma/R$ - скачок давления, обусловленный силами поверхностного натяжения.

Измерив превышение давления внутри газового пузыря над атмосферным и радиус пузыря, можно определить коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Пусть эта разница будет

$$p' \equiv p^* - p_0 = \rho_{ж}gh + 2\sigma/R$$

Тогда

$$\sigma = \frac{R}{2}(p' - \rho_{ж}gh) \quad (4)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

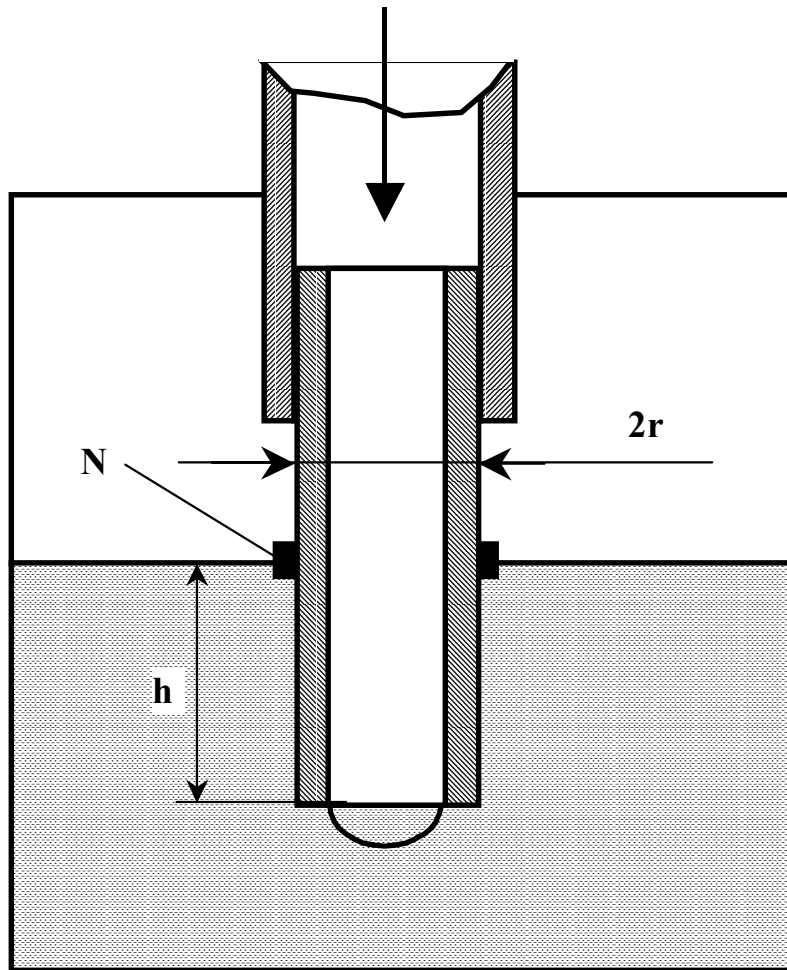


Рис.2

Один из простейших методов определения коэффициента поверхностного натяжения посредством измерения параметров газового пузыря состоит в следующем. Пусть трубка с узким каналом опущена вертикально в жидкость так, что ее нижний конец находится на глубине h (рис. 2). Жидкость поднимается в трубке, и ее поверхность имеет приблизительно сферическую форму. Если в эту трубку накачивать воздух, то поверхность жидкости, уступая давлению, начнет опускаться; по мере увеличения давления поверхность опускается вниз, пока, наконец, в жидкость у конца трубки не проникает полусферический пузырь, радиус которого равен радиусу отверстия трубки. Давление в пузыре определяют по формуле (3). В этом состоянии пузырь делается неустойчивым, так как при небольшом увеличении его радиуса уменьшается внутреннее давление, необходимое для равновесия. Поэтому, если давление остается постоянным или продолжает увеличиваться, равновесия быть не может; отделяясь от трубки, пузырь определяет момент замера давления внутри пузыря.

Экспериментальная установка представлена на рис. 3. Капилляр **К** опущен в испытываемую жидкость и соединен с манометром **М**, имеющим отсчетную шкалу **L**. Капилляр и манометр через вентиль **В** соединяются с резервуаром сжатого воздуха **Д**. Воздух в резервуар нагнетается с помощью насоса **С** через вентиль **А**. Для выпуска воздуха из резервуара имеется пробка **Е**.

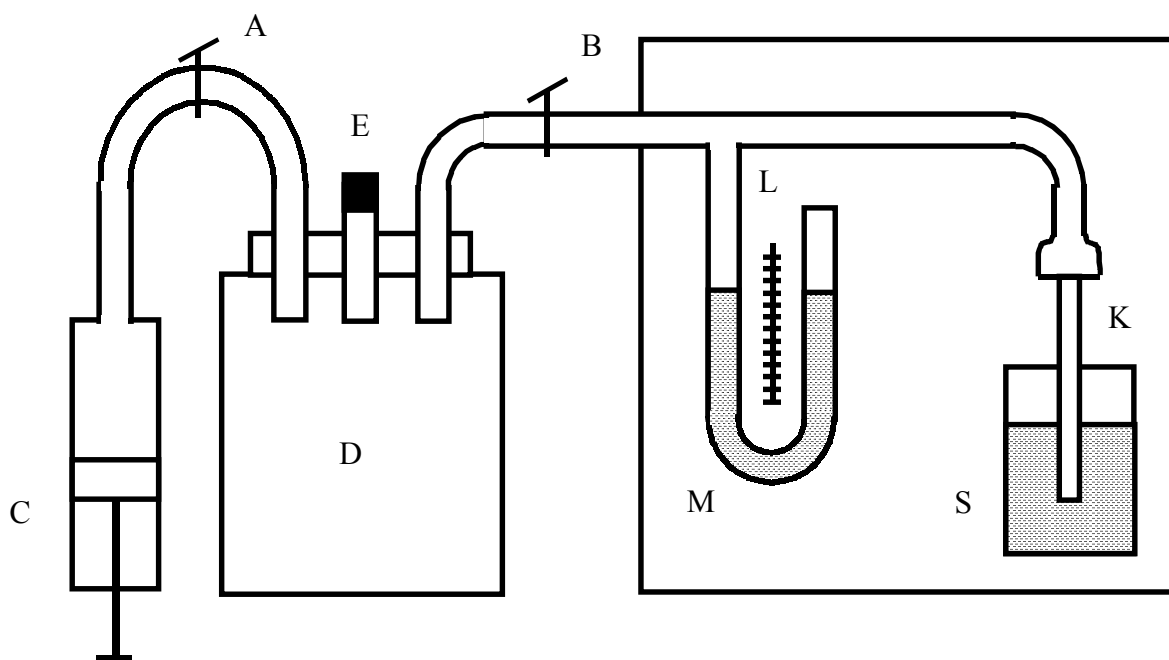


Рис. 3

Манометр показывает превышение давления воздуха в пузыре над атмосферным. Если разность высот жидкости в двух коленах манометра равна H , то

$$p' = \rho_l g H$$

где ρ_l - плотность жидкости в манометре. Тогда коэффициент поверхностного натяжения определяют по формуле

$$\sigma = \frac{R}{2} (\rho_l g H - \rho_{ж} g h), \quad (5)$$

которая следует из формулы (4).

Эксперимент следует выполнять в таком порядке.

1. Установить резиновое кольцо N (см. рис. 2) на нужную высоту.
2. Измерить расстояние от кольца до нижнего конца трубки (примерные значения расстояний резинового кольца от нижнего конца трубки 2, 3, 4 см).
3. Опустить трубку в жидкость так, чтобы кольцо находилось на уровне жидкости.
4. Убедившись, что вентиль B (см. рис. 3) закрыт, открыть вентиль A и накачать воздух в баллон насосом, делая при этом 4-5 полных качания. Закрыть вентиль A .
5. Медленно открывая вентиль B , регулировать истечение воздуха таким образом, чтобы пузыри воздуха образовывались каждые две секунды.
6. Отсчитывать давление по манометру, засекая уровня в его коленах. Давление будет подниматься, пока газовый пузырь не сделается неустойчивым, затем сразу упадет. Максимальное давление соответствует полусферическому пузырю с радиусом, равным радиусу капилляра, который указан на установке.
7. Открыв пробку в баллоне, выпустить воздух. Повторить опыт еще два раза. Результаты занести в таблицу.

Номер опыта	$h, 10^{-2}$ м	$H, 10^{-2}$ м	$\sigma_i, \text{Н/м}$	$\sigma, \text{Н/м}$

8. Изменить положение резинового кольца и повторить все измерения три раза. Результаты занести в таблицу.

9. В конце эксперимента выпустить воздух из баллона.

10. Вычислить значения коэффициента поверхностного натяжения по формуле (5) и результаты опыта занести в таблицу (плотности $\rho_{ж}$ и ρ_1 указаны на установке).

11. По формуле

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i$$

(где n - число измерений) вычислить среднее значение коэффициента поверхностного натяжения жидкости и занести в таблицу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему необходимо измерять максимальное давление при отрыве пузыря от нижнего конца трубки?
2. Пусть давление внутри пузыря создается насыщающими парами самой жидкости. Что произойдет, если такой пузырь быстро переместить в область с давлением, превышающим давление насыщающих паров жидкости?
3. Как зависит коэффициент поверхностного натяжения жидкости от температуры?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. М.: Наука, 1988.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6: Гидродинамика. М.: Наука, 1986.