

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО ФИЗИКЕ №81  
«ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ»**

Методические указания  
к лабораторным работам для студентов всех направлений подготовки

Казань  
2014

УДК 535  
ББК 22.34  
С 33

Методические указания к лабораторным работам по физике для студентов всех направлений подготовки. Лабораторная работа №81 «Изучение поверхностного натяжения жидкостей»/ Сост.: В.И.Сундуков, Казань: КГАСУ, 2014 г. – 10 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета

В методических указаниях рассматриваются некоторые вопросы, связанные с поверхностным натяжением жидкостей. Приведено описание лабораторной установки и изложена методика проведения эксперимента.

Данные методические указания являются составной частью методического обеспечения аудиторной и самостоятельной работы студентов всех направлений подготовки.

Рецензент  
доцент кафедры теплоэнергетики КазГАСУ  
**В.Н. Енюшин**

УДК 535  
ББК 22.34

© Казанский государственный  
архитектурно-строительный  
университет, 2014 г.

© Сундуков В.И., 2014

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Жидкости являются агрегатными состояниями вещества, занимающими промежуточное состояние между газом и твёрдым телом. Поэтому они обладают некоторыми свойствами как газообразных, так и твёрдых тел. Например, жидкости подобно твердым телам имеют определённый объем. С другой стороны жидкости подобно газам принимают форму сосуда, в котором они находятся. Однако явление поверхностного натяжения присуще только жидкостям. Рассмотрим это явление подробно.

В жидкостях среднее расстояние между молекулами значительно меньше, чем в газах. Молекулы располагаются настолько близко друг к другу, что силы притяжения между ними имеют заметную величину. Однако взаимодействие между ними быстро убывает с расстоянием и можно считать, что каждая молекула взаимодействует лишь с теми молекулами, которые находятся внутри сферы определенного радиуса  $r$  с центром в данной молекуле (сфера молекулярного действия). Если молекула, например  $A$ , находится внутри жидкости (рис. 1), то силы, действующие на них со стороны других молекул, взаимно компенсируются. Поскольку плотность пара гораздо меньше плотности жидкости, то на каждую молекулу, например  $B$ , находящуюся в поверхностном слое, действует сила, направленная вглубь жидкости перпендикулярно ее поверхности (рис. 1). Величина этой силы растет в направлении от внутренней к наружной границе поверхностного слоя жидкости. Таким образом, в поверхностном слое жидкости обнаруживается нескомпенсированность молекулярных сил: частицы жидкости, находящиеся в этом слое, испытывают направленную внутрь силу притяжения остальной частью жидкости.

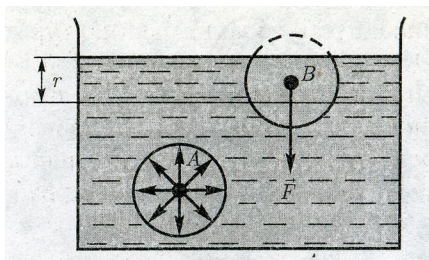


Рис. 1. Окружение молекулы внутри жидкости и в поверхностном слое.

Переход молекулы из глубины жидкости в поверхностный слой связан с совершением работы против действующих в поверхностном слое сил. Эта работа совершается молекулой за счет запаса ее кинетической энергии и идет на увеличение потенциальной энергии молекулы. При обратном переходе молекулы внутрь жидкости потенциальная энергия, которой обладала молекула в поверхностном слое, переходит в кинетическую энергию молекулы. Таким образом, молекулы в поверхностном слое обладают дополнительной потенциальной энергией, а поверхностный слой в целом обладает дополнительной энергией  $W$ , которая входит составной частью во внутреннюю энергию жидкости. Поскольку энергия  $W$  обязана своим происхождением наличию поверхности, то она должна быть пропорциональна площади  $S$  этой поверхности.

$$W = \alpha \cdot S, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения. Коэффициент поверхностного натяжения численно равен работе, которую надо совершить для увеличения поверхности жидкости на единицу площади. Его величина зависит от природы жидкости, от наличия в ней примесей и от температуры. Поскольку с повышением температуры различие в плотностях жидкости и ее насыщенного пара уменьшается, то при этом уменьшается и коэффициент поверхностного натяжения. При критической температуре он обращается в нуль. Из формулы (1) следует, что коэффициент поверхностного натяжения в ед. СИ измеряется в Дж/м<sup>2</sup>.

Физический смысл коэффициента можно определить иначе. Поскольку всякая система в состоянии равновесия имеет минимальную энергию, то очевидно из-за наличия поверхностной энергии жидкость в своем стремлении к равновесию стремится сократить свою поверхность до минимума. Жидкость ведет себя так, как если бы она была заключена в упругую растянутую пленку, стремящуюся сжаться. Следовательно, должны существовать силы, препятствующие увеличению поверхности жидкости, стремящиеся сократить ее. Они должны быть направлены вдоль самой поверхности, по касательной к ней. Эти силы называются силами поверхностного натяжения. Они возникают вследствие стремления жидкости уменьшить свою поверхность, а следовательно, и поверхностную энергию. Однако первопричиной возникновения сил поверхностного натяжения следует считать силы, действующие на молекулы поверхностного слоя и направленные внутрь жидкости.

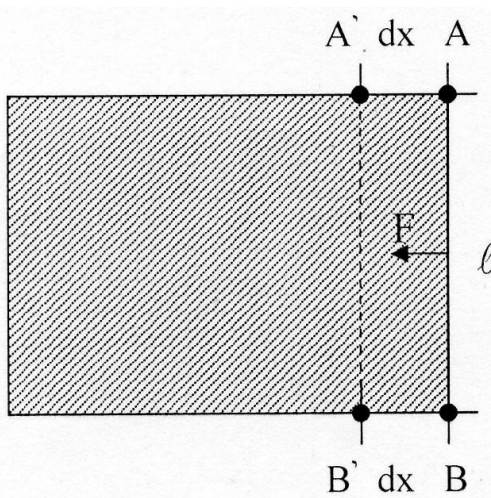
Мысленно представим, что поверхностный слой жидкости занимает часть рамки, как показано на рис. 2. Этот слой стремится сократить свою поверхность. Если участок АВ рамки может свободно перемещаться, то при сокращении поверхности эта сторона переместится влево на расстояние  $dx$ , что соответствует изменению площади поверхности на  $dS = l \cdot dx$ . Со-

вершаемая при этом работа равна  $dA = F \cdot dx$ . С другой стороны, из формулы (1)  $dA = W = \alpha \cdot S = \alpha \cdot l \cdot dx$ .

Отсюда сила поверхностного натяжения  $F$ , сокращающая поверхность жидкости, равна

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

Формула (2) дает второе определение коэффициента поверхностного натяжения (вытекающее из первого): коэффициент поверхностного натяжения численно равен силе поверхностного натяжения, действующей на единицу длины контура, ограничивающего поверхность. В соответствии с этим коэффициент поверхностного натяжения измеряется в Н/м.



На форму поверхности жидкости, налитой в сосуд, влияет взаимодействие молекул жидкости с молекулами твердого тела. Если силы взаимодействия между молекулами жидкости больше, чем между молекулами жидкости и твердого тела, то жидкость не смачивает твердое тело. Если же силы взаимодействия между молекулами жидкости меньше, чем между молекулами жидкости и твердого тела, то жидкость смачивает это твердое тело.

Рис.2. Поверхность жидкости.

При несмачивании в слое жидкости, который прилегает к твердому телу, результирующая сила направлена в сторону жидкости. Поверхность жидкости располагается перпендикулярно к силе и у вертикальной стенки располагается, как показано на рис.3 слева. Угол  $\theta$  между касательными к поверхности жидкости и твердого тела называется краевым углом. В случае несмачивания краевой угол тупой ( $\theta > 90^\circ$ ). При смачивании в слое жидкости, который прилегает к твердому телу, результирующая сила направлена в сторону твердого тела. При этом угол  $\theta < 90^\circ$  (острый) и поверхность жидкости располагается у вертикальной стенки, как показано на рис. 3 справа.

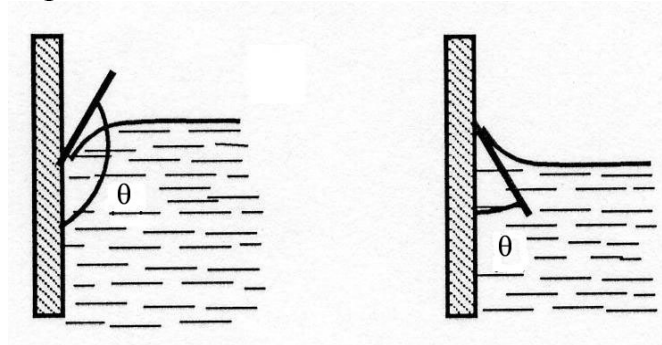


Рис.3. Границы жидкости с твёрдым телом стенки сосуда. Слева – случай не смачивания, справа – смачивания.

Взаимодействие молекул жидкости с молекулами твердого тела ведет к искривлению поверхности жидкости вблизи стенок сосуда. Если поверхность жидкости не плоская, то стремление ее к сокращению приводит к возникновению давления, дополнительного по отношению к тому, которое испытывает жидкость с плоской поверхностью. В случае выпуклой поверхности это давление положительно, а в случае вогнутой – отрицательно.

Лаплас нашел, что дополнительное давление, производимое на жидкость поверхностным слоем произвольной формы, равно:

$$\Delta p = \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (3)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны двух любых взаимно перпендикулярных нормальных сечений поверхности. Для сферической поверхности  $R_1 = R_2 = R$ .

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{R}. \quad (4)$$

В узких сосудах (капиллярах) влияние стенок распространяется на всю поверхность жидкости, и она искривлена на всем своем протяжении. Такого рода изогнутые поверхности носят название менисков. Искривление поверхности жидкости приводит к появлению дополнительного давления. Непосредственным следствием этого дополнительного давления является капиллярный подъем (или опускание) жидкости.

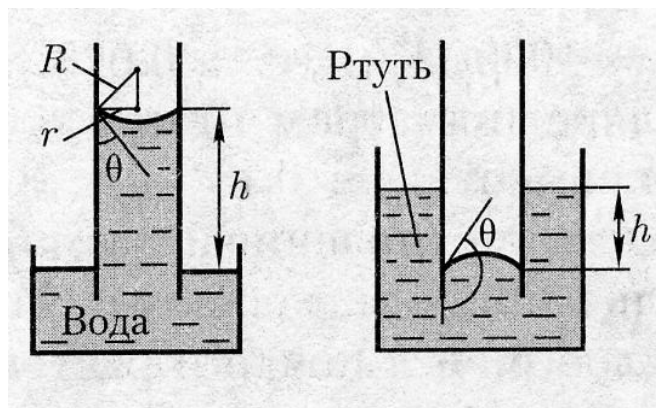


Рис.4. Жидкости в капиллярах. Слева случай смачивания, справа – не смачивания.

На рис. 4 изображены два капилляра, опущенные в широкий сосуд с жидкостью. Если жидкость смачивает стенки капилляра, то ее поверхность внутри капилляра будет вогнутой, если не смачивает – выпуклой. Здесь  $R$  – радиус кривизны поверхности жидкости,  $r$  – радиус капилляра. Искривление поверхности ведет к появлению дополнительного давления, и жидкость в первом случае ( $\Delta p < 0$ ) будет подниматься по капилляру на некоторую высоту  $h$ , во втором ( $\Delta p > 0$ ) – опускаться.

В данной работе исследуется только смачивающая стекло жидкость - вода. Явление поднятия жидкости, смачивающей стенки в капилляре, обу-

словлено возникновением разности давлений  $\Delta p = p_2 - p_1$  по разные стороны кривой поверхности жидкости. Эта разность давлений для случая сферической поверхности жидкости в капилляре определяется формулой

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{R}, \text{ причём } R = \frac{r}{\cos \theta}, \quad (5)$$

где  $R$  – радиус кривизны поверхности жидкости в капилляре,  $r$  – радиус капилляра

При полном смачивании, что имеет место, например, для воды в стеклянном капилляре  $\theta = 0$ ,  $\cos \theta = 1$  и тогда  $R=r$

Разница давлений возникшая, за счёт кривизны поверхности жидкости уравнивается гидростатическим давлением столба жидкости.

$$\Delta p = \rho g h. \quad (6)$$

Тогда можно записать

$$\frac{2\alpha}{r} = \rho g h. \quad (7)$$

Отсюда получается формула для определения коэффициента поверхностного натяжения

$$\alpha = \frac{r \rho g h}{2}. \quad (8)$$

На практике трудно точно измерить высоту поднятия жидкости в одном капилляре и поэтому в жидкость опускают два капилляра с различными радиусами и измеряют разность уровней жидкостей в этих капиллярах.

$$\alpha = \frac{\rho g r_1 r_2 \Delta h}{2 \Delta r}. \quad (9)$$

Здесь  $\Delta r = r_1 - r_2$  это разность радиусов двух капилляров, а  $\Delta h = h_1 - h_2$  это разность уровней жидкостей, наблюдаемая в них.

Капиллярные явления играют большую роль в природе. Множество мельчайших капилляров имеется в растениях. В деревьях по капиллярам влага из почвы поднимается до вершин деревьев, где через листья испаряется в атмосферу. В почве имеются капилляры, которые тем уже, чем плотнее почва. Вода по этим капиллярам поднимается до поверхности и быстро испаряется, а земля становится сухой. Ранняя весенняя вспашка земли разрушает капилляры, т. е. сохраняет подпочвенную влагу и увеличивает урожай. Большое значение капиллярные явления имеют в строительном де-

ле. Например, чтобы кирпичная стена не сырела, между фундаментом дома и стеной делают прокладку из вещества, в котором нет капилляров. В бумажной промышленности приходится учитывать капиллярность при изготовлении различных сортов бумаги. Например, при изготовлении писчей бумаги ее пропитывают специальным составом, закупоривающим капилляры. В быту капиллярные явления используют в фитилях, в промокательной бумаге, и т.п.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Целью работы является:

- Изучение явления поверхностного натяжения.
- Освоение методики измерений с помощью катетометра.
- Измерение коэффициента поверхностного натяжения воды.

Уровень жидкости в капиллярах измеряют при помощи катетометра. Для этого нужно подготовить его к работе. Катетометр состоит из вертикальной колонки на треножнике, по которой вверх и вниз перемещается измерительная каретка (1), она также может поворачиваться вокруг вертикальной оси. Измерение уровней производят при помощи зрительной трубой и расположенного внутри нее микроскопа с измерительной шкалой.

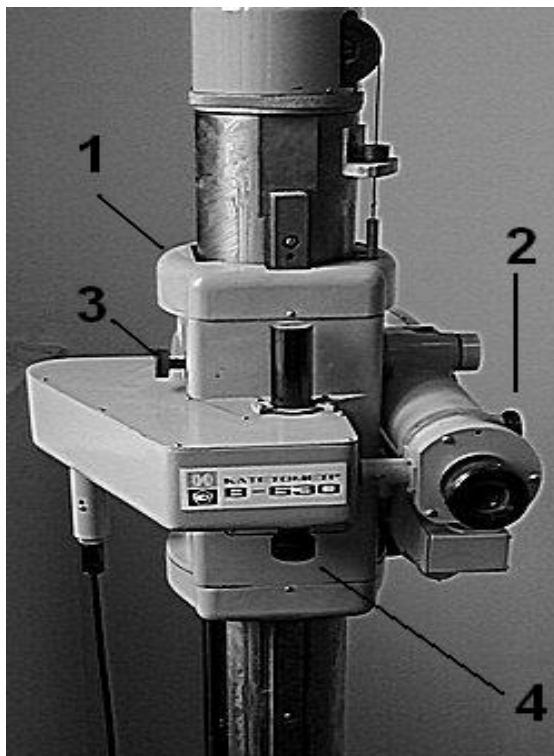


Рис. 5. Общий вид катетометра.

1 – измерительная каретка, 2 – винт наводки на резкость зрительной трубы на измеряемый объект, 3 – винт фиксирующий каретку на колонке, 4 – регулирующий винт шкалы катетометра.

Колонка катетометра уже выставлена вертикально грубо по круглому уровню в нижней части станины прибора с помощью винтов на концах треножника. Точное выставление вертикали осуществлено при помощи



специальных винтов на измерительной каретке инженером кафедры и студентам её делать не следует. В связи с этим запрещается крутить винты не указанные на рисунке. Расстояние объектива зрительной трубы от измеряемого объекта должно быть 50—200 см. Для подсветки измерительной шкалы катетометр включают в сеть переменного тока 220В. Далее описывается процедура наводки зрительной трубы на объект (на капилляры). Скорее всего после предыдущего занятия катетометр уже настроен и требуется только небольшая коррекция. Если в поле зрительной трубы капилляры не видны, то необходимо проделать следующие мероприятия.

Отпустив фиксирующий винт 3, передвигают измерительную каретку по вертикали и вращают по горизонтали, добиваясь того, чтобы в поле зрения оказались мениски капилляров. Вращая винт 2, добиваются резкости изображения. На рисунке 6 приведено поле наблюдения зрительной трубы.

После того как в поле зрения появились капилляры закручивая винт 3 фиксируют каретку по вертикали и приступают непосредственно к измерению уровней.

Точную наводку зрительной трубы на мениск жидкости в капилляре производят с помощью микрометрического винта 4 при закрепленном винте 3. Трубу наводят так, чтобы середина мениска располагалась посередине углового биссектора на уровне горизонтального штриха сетки зрительной трубы (на рис.6 они расположены справа). Осуществив точную наводку, снимают показание высоты (h) с помощью зрительной трубы катетометра. Целые значения миллиметров показывает верхнее число справа около штриха. На рис. 6 это 586 мм. Десятые доли миллиметра определяют по вертикальной шкале (0-9) сетки от нулевого биссектора до миллиметрового штриха, сотые доли мм – по горизонтальной шкале сетки там, где миллиметровый штрих располагается посередине биссектора. На рис. 6 уровень равен 586,29 мм

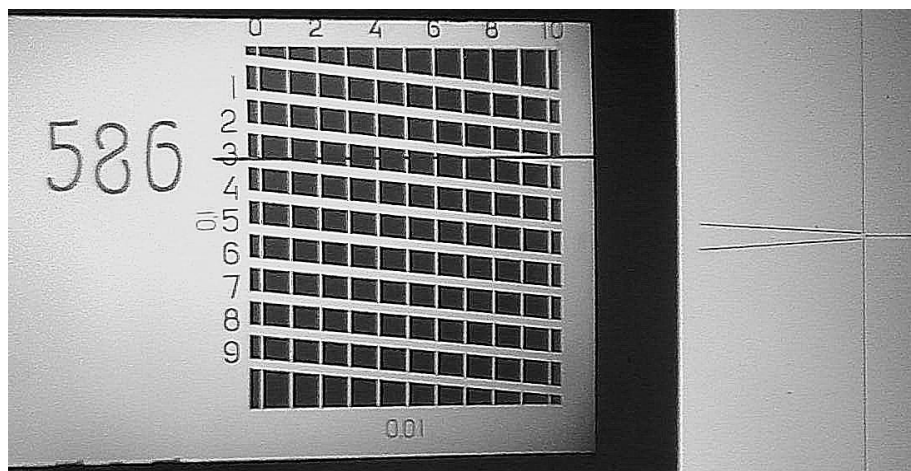


Рис.6 Вид шкалы катетометра.

## ИЗМЕРЕНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Включите катетометр в сеть. Пользуясь изложенной выше методикой наведите зрительную трубу на капилляры.
2. Изучите методику проведения отсчётов. Проведите измерения уровней поднятия менисков в первом  $h_1$  и втором  $h_2$  капиллярах.
3. Пользуясь формулой (9), рассчитайте коэффициент поверхностного натяжения воды. Радиусы капилляров указаны на установке.
4. Запишите результаты измерений и вычислений в протокол отчёта.

## ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Объясните механизм возникновения поверхностного натяжения жидкостей.
2. Дайте определение коэффициента поверхностного натяжения.
3. Расскажите про силы поверхностного натяжения.
4. Запишите формулу Лапласа.
5. Расскажите про смачивание и несмачивание поверхностей твёрдого тела жидкостями. Что такое краевой угол?
6. Что называется капиллярами, и как ведут себя в них жидкости?
7. Какую роль играют капиллярные эффекты в окружающей нас жизни?
8. В чем заключается метод определения коэффициента поверхностного натяжения в данной работе?
9. Что измеряют при помощи катетометра, и как он устроен?