

**Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
ФГБОУ ВО «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт механизации и технического сервиса

Кафедра физики и математики

Лабораторный практикум по дисциплине «Физика»

**ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ И ВНУТРЕННЕГО
ТРЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ**



Казань, 2022

УДК 530.10

ББК 22.36

Составитель: к.ф.-м.н., доцент кафедры физики и математики
Рахматуллина Р.Г.

Рецензенты:

Гаязиев И.Н. - к.т.н., доцент кафедры «Тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов» ФГБОУ ВО Казанский ГАУ;

Иванов В.В. - к.т.н., зам. директора по научной работе ООО НПП «ЭкоЭнергоМаш».

Лабораторный практикум утвержден и рекомендован к печати на заседании кафедры «Физика и математика» ФГБОУ ВО Казанский ГАУ «20» декабря 2021 года (протокол № 5).

Практикум обсужден, одобрен и рекомендован к печати на заседании методической комиссии Института механизации и технического сервиса ФГБОУ ВО Казанский ГАУ «23» декабря 2021 года (протокол № 5).

Рахматуллина, Р.Г. Изучение поверхностного натяжения и внутреннего трения жидкостей: лабораторный практикум / Р.Г. Рахматуллина.- Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2022. – 38 с.

Лабораторный практикум по дисциплине «Физика» на тему: «Изучение поверхностного натяжения и внутреннего трения жидкостей» предназначено для студентов всех специальностей и направлений подготовки института механизации и технического сервиса, агрономического факультета, факультета лесного хозяйства и экологии. Изложены основные свойства жидкостей, явлений переноса в них, а также определение коэффициента вязкости жидкости капиллярным вискозиметром, определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса и определение коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва капли. Каждая лабораторная работа содержит краткое изложение теории, описание экспериментальной установки, обсуждение методики выполнения работ и контрольные вопросы для самостоятельной подготовки студентов.

УДК 530.10

ББК 22.36

© Казанский государственный аграрный университет, 2022 г.

Содержание

1 ВВЕДЕНИЕ	4
1.1 Агрегатные состояния, фазы, фазовые переходы	4
1.2 Поверхностное натяжение	8
1.3 Смачивание. Формула Лапласа. Капиллярность	10
1.4 Капилляры. Капиллярные явления в жизни	13
1.5 Вязкость в жидкостях	16
2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.1. Определение коэффициента вязкости жидкости капиллярным вискозиметром	19
3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.2. Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса	24
3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.3. Определение коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва капли	29
4 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	33
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	34
ПРИЛОЖЕНИЕ	35

1 ВВЕДЕНИЕ

1.1 Агрегатные состояния, фазы, фазовые переходы

Фаза – это равновесное состояние вещества, которое отличается по своим физическим свойствам от других возможных равновесных состояний того же вещества. Например, если в горячий чай добавить немного сахара, то эта система является трёхфазной. Первой жидкой фазой будет являться чай, второй газообразной фазой является воздух с парами чая, а третьей твердой фазой будет являться сахар.

Агрегатные состояния – это состояние одного и того же вещества, переходы между которыми сопровождаются скачкообразным изменением его физических свойств.

Вещества могут находиться в разных агрегатных состояниях: в твердом агрегатном состоянии, жидком и газообразном агрегатных состояниях.

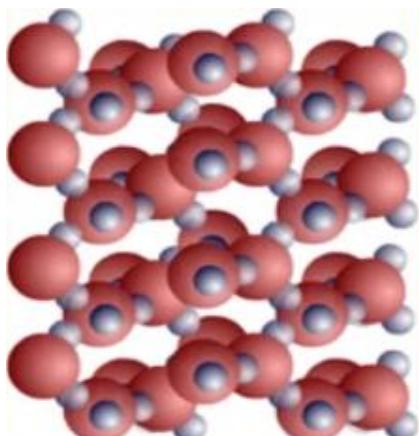


Рисунок 1 – Твердое состояние

Твердые вещества имеют определенную форму и постоянный объем: молекулы и атомы сильно сцеплены друг с другом, образуя кристаллическую решетку. В твердых телах атомы, молекулы и ионы строго расположены в узлах кристаллической решетки. Поэтому силы межмолекулярного взаимодействия между частицами очень велики (рис.1).



Рисунок 2 – Газообразное состояние

Если тело находится в газообразном агрегатном состоянии, то это тело не имеет ни формы, ни объема. В газах молекулы двигаются хаотично, имеют большие расстояния между молекулами, атомами, что даже силы межмолекулярного взаимодействия не влияют на движение молекул. Молекулы газа соударяются равномерно между собой и со стенками сосуда (рис.2).

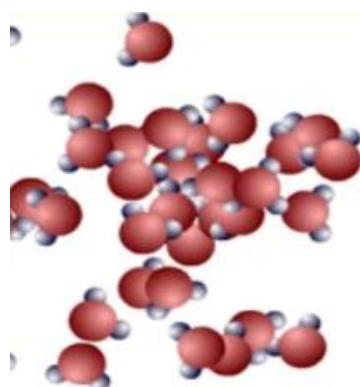


Рисунок 3 – Жидкое состояние

Молекулы в жидкостях расположены на расстояниях, равных размерам самих молекул, сохраняя ближний порядок, поэтому жидкость сохраняет свой объем. В начале, каждая наименьшая частица колеблется около положения равновесия, потом через небольшое время частица смещается на некоторое расстояние. Поэтому жидкости текут и могут принимать форму сосуда (рис.3).

Жидкости - это вещества, которые занимают промежуточное состояние между твердыми и газообразными телами. Например, для кристаллического состояния характерно упорядоченное расположение атомов или молекул, а в газах атомы молекулы имеют хаотичное расположение. Атомы или молекулы в жидкостях имеют ближний порядок. Это означает, что по отношению к любой

частице расположение ближайшие, к ней является упорядоченным, но за счет теплового движения по мере удаления от данной частицы порядок в их расположении быстро исчезает.

Молекулы жидкостей имеют нерегулярный колебательный характер. Молекулы жидкостей колеблются около положения равновесия, и через некоторое время скачкообразно занимают новое положение. Таким образом, молекулы или атомы жидкостей ведут «оседло-кочевой образ жизни», при котором кратковременные переезды сменяются относительно длительными периодами оседлой жизни. Средняя длительность колебаний молекул около одного и того же положения равновесия оказывается у каждой жидкости определенной величиной. Для большинства жидкостей период колебания молекул около положения равновесия составляет $10^{-10} \dots 10^{-12}$ с.

Если τ_0 - период колебания молекулы около положения равновесия, а τ - время пребывания молекулы около положения равновесия, то зависимость τ от температуры жидкости T определяется формулой:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\frac{\Delta W}{kT}}, \quad (1)$$

где ΔW – энергия активации, k – постоянная Больцмана.

Энергия активации – это энергия, которую нужно сообщить молекуле, чтобы она могла перескочить из одного положения равновесия в другое. Эту энергию молекула может получить при столкновениях с соседними молекулами. Энергия активации для жидкостей примерно составляет $\Delta W = (2 - 3) \cdot 10^{-20}$ Дж.

Из формулы (1) следует, что τ быстро убывает при увеличении T , а вероятность переселения частицы растет. Частые переходы и их большое число обеспечивают основное свойство жидкости – текучесть. По истечении времени τ молекула перескакивает из одного положения равновесия в другое на расстояние порядка 10^{-10} м. Если время действия внешней силы t или его период при колебательном характере воздействия меньше τ , то жидкость не обнаруживает текучести. Если $t \gg \tau$, то за это время молекулы много раз перемещаются из одного положения равновесия в другое и жидкость изменяет свою форму, т.е. течет.

Если вещество переходит из одного агрегатного состояния в другое, то этот переход называется фазовым. Фазовые переходы бывают первого рода и второго рода. Агрегатные состояния, такие как плавление, кристаллизация

называются **фазовым переходом первого рода**, так как эти переходы происходили выделением или поглощением теплоты. Если фазовый переход, не происходит с поглощением или выделением теплоты, но изменяется теплоемкость, называют **фазовым переходом второго рода**. Например, при переходе ферромагнитных веществ, при определенных, температур и давлении в парамагнитное состояние.

Физическую сущность различия между твердым, жидким и газообразным состоянием вещества можно объяснить с помощью потенциальной кривой взаимодействия молекул (рис.4).

Расстояние между молекулами обозначим через $-r$, а потенциальную энергию обозначим через $-U$.

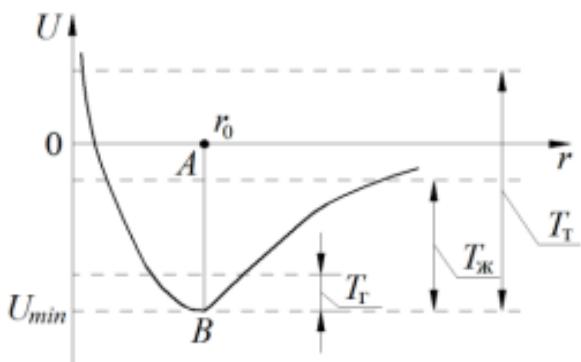


Рисунок 4 – Потенциальная кривая взаимодействия молекул

Если молекулы, совершая тепловые движения находятся в нижней части ямы AB ($T_g \ll AB$), то это соответствует твердому состоянию вещества. При этом молекулы совершают небольшие колебательные движения и кинетическая энергия намного меньше глубины потенциальной ямы.

Если молекулы, совершая тепловые колебательные движения, могут покинуть потенциальную яму, то это соответствует жидкому состоянию. При этом кинетическая энергия теплового, движения молекул немного меньше глубины потенциальной ямы ($T_{\text{ж}} < AB$).

Если же средняя кинетическая энергия теплового движения молекул значительно больше глубины потенциальной ямы ($T_{\text{т}} \gg AB$), то молекулы начинают двигаться свободно, что соответствует газообразному состоянию вещества.

1.2 Поверхностное натяжение

Рассмотрим наименьшую частицу, находящуюся внутри жидкости. Эта частица будет окружена со всех сторон другими наименьшими частицами, поэтому силы притяжения наименьших частиц будут равны нулю (рис. 5, *а*).

Рассмотрим наименьшую частицу, находящуюся на поверхности, то силы притяжения со стороны соседних частиц не уравновешены, и это значит, что на нее действует сила, направленная внутрь жидкости. Поэтому наименьшая частица стремится перейти, внутрь, при этом поверхность жидкости стремиться уменьшиться (рис. 5, *б*).

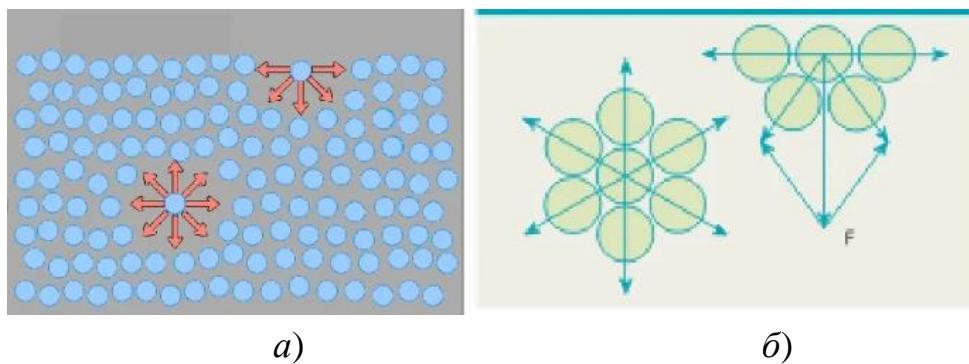


Рисунок 5 – Схема взаимодействия наименьших частиц со своими соседями частицами

В результате этого, энергия молекул на поверхности отличается от энергии внутри тела. Разность между энергией всех молекул вблизи поверхности раздела и той энергией, которую эти молекулы имели бы, если бы они находились внутри тела, называется **поверхностной энергией**.

Силы всех молекул поверхностного слоя оказывают на жидкость давление, называемое молекулярным или внутренним. Молекулярное давление не действует на тело, помещенное в жидкость, так как оно обусловлено силами, действующими только между молекулами самой жидкости.

Для перенесения молекул из глубины жидкости поверхностный слой, необходимо совершить определенную работу. Эта работа идет на увеличение поверхностной энергии жидкости. В результате этого молекулы поверхностного слоя жидкости обладают большей потенциальной энергией, чем молекулы внутри жидкости.

Сила поверхностного натяжения направлена по касательной к поверхности жидкости и перпендикулярна к контуру, ограничивающему поверхность жидкости.

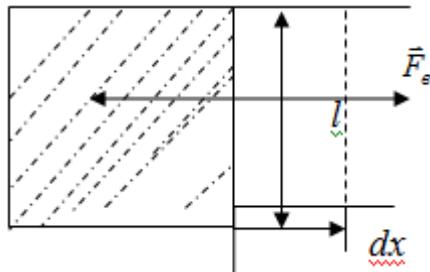


Рисунок 6 – Рамка в форме прямоугольника для определения коэффициента поверхностного натяжения

Рассмотрим рамку с длиной l и одна из сторон подвижна (рис. 6). Пусть прямоугольная рамка покрыта пленкой жидкости и ограничена с двух сторон поверхностным слоем. На рамку будет действовать сила со стороны пленки жидкости равная,

$$F = 2\sigma l. \quad (2)$$

Чтобы рамка находилась в равновесии, к ней нужно приложить внешнюю силу F_B , равную силе натяжения пленки жидкости: $F_B = 2\sigma l$.

Если под действием силы перекладина переместится в направлении действия силы F_B , на величину dx , то будет произведена работа. При этом процессе работа силы F_B над жидкостью будет равна:

$$dA = F_B \cdot dx = 2\sigma l \cdot dx = \sigma dS, \quad (3)$$

где dS – приращение площади поверхности пленки, σ - коэффициент поверхностного натяжения.

Если эта работа совершается изотермически и обратимо, то она равна увеличению свободной энергии dE поверхности жидкости:

$$dA = dE = \sigma. \quad (4)$$

Из формул (3) и (4) можно получить несколько формул для определения коэффициента поверхностного натяжения σ :

$$\sigma = \frac{dA}{dS}. \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{dE}{dS}. \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{F}{2l}. \quad (7)$$

Из выражения (5) следует, что если площадь равна единице ($\Delta S = 1$), то коэффициент поверхностного слоя численно равна работе, которую

необходимо совершить для увеличения площади поверхности жидкости на единицу площади.

Единицей измерения коэффициент поверхностного натяжения σ является $\text{Дж}/\text{м}^2$ или $\text{Н}/\text{м}$.

Коэффициент поверхностного натяжения зависит от плотности веществ, от количества примесей, от температуры.

Для жидкости с увеличением плотности вещества, коэффициент поверхностного слоя уменьшается. Так, на границе двух жидкостей коэффициент поверхностного натяжения всегда меньше, чем на границе жидкость – газ.

Количества примесей, которые, содержаться в жидкостях способны как понижать, так и повышать поверхностное натяжение. Если энергия взаимодействия молекулы растворенного вещества с молекулой растворителя меньше энергии взаимодействия молекул растворителя между собой, то при выходе молекулы примеси на поверхность и вытеснении ею одной молекулы растворителя из поверхности в объем жидкости будет выделяться энергия. Так как жидкость стремится в состояние с минимальной поверхностной энергией, то молекулы примеси будут вытесняться на поверхность жидкости и понижать поверхностное натяжение раствора. Такие вещества называются поверхностно-активными по отношению к данной жидкости. Простейшими поверхностно-активными веществами по отношению к воде являются спирты, жирные кислоты и их соли (мыла).

С увеличением температуры силы межмолекулярного взаимодействия уменьшаются, так как при этом увеличивается кинетическая энергия движения молекул, жидкость расширяется, и среднее расстояние между молекулами возрастает. Поэтому с повышением температуры жидкости величина коэффициента поверхностного натяжения линейно убывает.

1.3 Смачивание. Формула Лапласа. Капиллярность

Смачивание — это явление, возникающее при соприкосновении жидкости и твердого тела. Это явление проявляется на границе соприкосновения твердых тел с жидкостями. Явление смачивания зависит от сил, действующих между молекулами поверхностных слоев. Поверхность жидкости, искривленная на границе с твердым телом, называется **мениском**. Линия, по которой мениск пересекается с твердым телом, называется **периметром смачивания**.

Если силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела больше, чем силы притяжения между самой жидкости, то происходит явление смачивания жидкости. При этом жидкость стремиться растечься по твердому телу или по жидкости.

Если силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела меньше, чем между молекулами жидкости, то происходит явление несмачивания жидкости. При этом жидкость стремиться сбраться в каплю.

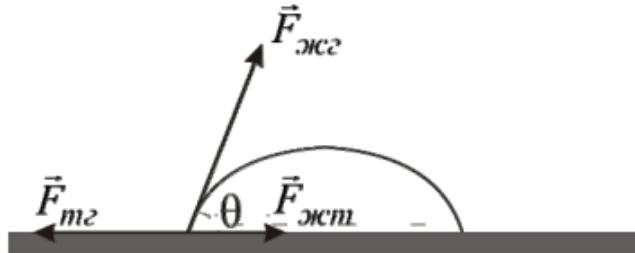


Рисунок 7 – Иллюстрация капли жидкости на поверхности твердого тела

Рассмотрим каплю жидкости на поверхности твердого тела. Имеются три границы раздела фаз: твердое тело–жидкость, твердое тело – газ, жидкость – газ (рис.7). Линия пересечения всех трех поверхностей раздела называется линией смачивания.

На рисунке 7 показаны вектора сил, действующих на линию разрыва поверхности. Здесь $\vec{F}_{\text{тг}}$, $\vec{F}_{\text{жт}}$, $\vec{F}_{\text{жг}}$ - силы, действующие на линию разрыва по касательной к поверхностям раздела фаз твердое тело – газ, жидкость – твердое тело и жидкость – газ соответственно. При динамическом равновесии (капля не растекается и не скатывается) равнодействующая этих трех сил должна быть равна нулю, или, рассматривая проекции сил, можно записать в виде:

$$F_{\text{жт}} + F_{\text{жт}} \cdot \cos \theta - F_{\text{тг}} = 0, \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{мг}} = \sigma_{\text{жт}} + \sigma_{\text{жт}} \cdot \cos \theta. \quad (9)$$

Уравнение (9) называется **уравнением Юнга**.

Явление смачивания характеризуется краевым углом θ . **Угол смачивания** θ («тэта») — это угол между смачиваемой поверхностью твердого тела и поверхностью жидкости на границе «жидкость – твердое тело» (точнее между смачиваемой поверхностью и касательной к поверхности жидкости в точке данной границы) (рис.8).

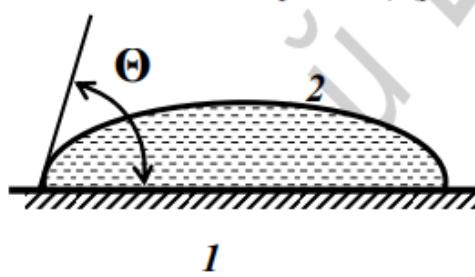


Рисунок 8 – Иллюстрация краевого угла θ : 1- поверхность твердого тела, 2- поверхность жидкости

В зависимости от того какие значения принимает краевой угол различают несколько видов явления смачивания. Рассмотрим все виды явления смачивания подробнее:

1. Если краевой угол $\theta = 0^\circ$, то происходит **полное смачивание** или смачивание называют идеальным (рис. 9,а). Например, бензин или нефть на поверхности воды.
2. Если краевой острый ($0 < \theta < 90^\circ$), то происходит **сильное смачивание** (рис. 9,б). Например, спирт на полированном столе. Поверхность с сильным смачиванием называют **смачиваемой поверхностью**.

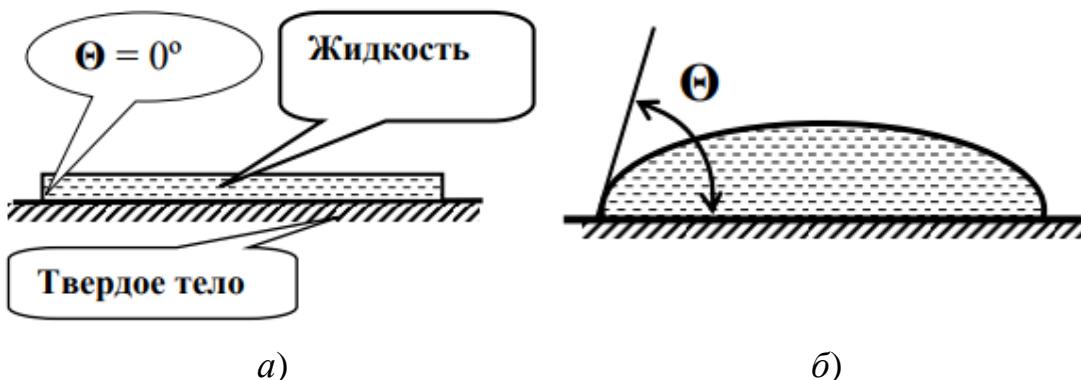


Рисунок 9 – Иллюстрация краевого угла θ : а - полное смачивание, б - сильное смачивание

3. Если краевой угол тупой ($90^\circ < \theta < 180^\circ$), то происходит **слабое смачивание** (рис. 10,а). Например, капелька воды на тефлоновой сковородке. Такую поверхность называют **несмачиваемой поверхностью**.

4. Если краевой угол $\theta = 180^\circ$, то происходит **полное несмачивание** или идеальное несмачивание (рис. 10,б). Например, шарик ртути на тщательно очищенной и отполированной поверхности металла.

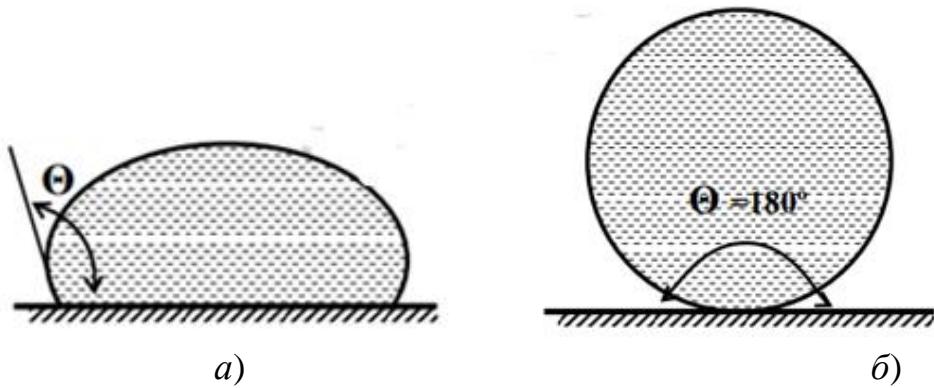


Рисунок 10 – Иллюстрация краевого угла смачивания θ : *а* – слабое смачивание, *б* – полное несмачивание

1.4 Капилляры. Капиллярные явления в жизни

Капилляры – это узкие трубы в форме цилиндра с диаметром около миллиметра. Если жидкость находится в капилляре, то из-за явления полного смачивания или неполного несмачивания поверхность жидкости искривляется вблизи стенок сосуда.

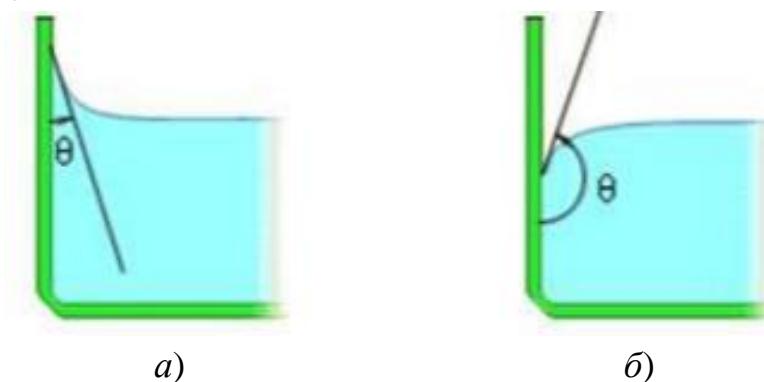


Рисунок 11 – Иллюстрация искривления поверхности жидкости вблизи стенки сосуда

Для выпуклого мениска искривляется вся поверхность жидкости, принимая выпуклую форму (рис. 11, *б*) или для вогнутого мениска принимая вогнутую форму (рис. 11, *а*).

Искривление поверхности жидкости создает дополнительное давления. Для выпуклого мениска дополнительное давление больше нуля ($p>0$), для вогнутого мениска дополнительное давление меньше нуля ($p<0$) (рис. 12).

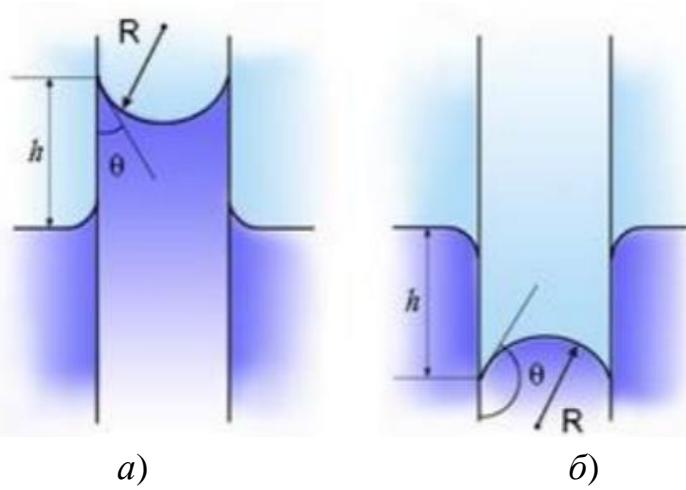


Рисунок 12 – Искривление поверхности жидкости: *а* - капилляр в смачивающей жидкости, *б* – капилляр в не смачивающей жидкости

Дополнительное давление рассчитаем, используя формулу Лапласа, которая принимает следующий вид:

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (10)$$

где R_1 и R_2 – радиусы мениска, σ - коэффициент поверхностного натяжения.

Дополнительное давление для сферической капли, где радиусы равны $R_1=R_2$ имеет вид (рис. 13):

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R}. \quad (11)$$

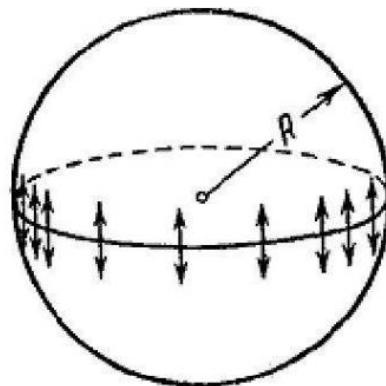


Рисунок 13 – Сферическая капля

Для капилляров добавочное давление $\Delta P = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{R}$, где $\frac{R}{\cos \theta}$ - радиус кривизны мениска (рис.14).

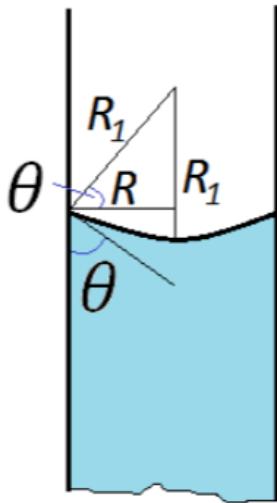


Рисунок 14 – Радиус кривизны мениска

Когда вода проникает в капилляр и не смачивает стенки капилляра, то образуется выпуклый мениск. Поверхность мениска стремится стать плоской, в результате поверхностного натяжения и давления. Это давление уравновешивает давление воды, которая стремиться проникнуть в капилляр. Чем выше поверхностное натяжение и чем уже капилляр, тем больше должно быть давление, которое может протолкнуть воду через капилляр.

Уровень идеально смачивающей (несмачивающей) жидкости в капилляре радиуса r выше (ниже), чем в сообщающемся с ним широком сосуде, на высоту h .

Высота капиллярного подъёма выражается уравнением:

$$h = \frac{2\sigma}{r\rho g}, \quad (12)$$

где h – высота капиллярного поднятия, σ - поверхностное натяжение, r – радиус капилляра, ρ - плотность жидкости, g - ускорение свободного падения.

Капиллярные явления определяют условия образования зародышей конденсации, кипения, кристаллизации, играют важную роль в процессах сушки. Понижение давления пара над вогнутой поверхностью жидкости обусловливает конденсацию пара в порах смачиваемых пористых тел, этим объясняется гигроскопичность пористых и порошковых материалов. Поверхности многих строительных материалов(кирпич, бетон, природный камень) подвергают гидрофобизации с целью защиты их от воздействия воды и продления срока службы конструкций из них.

Явление капиллярности играет огромную роль в самых разнообразных процессах, происходящих в природе. Так, если поступление питательных веществ в корневую систему растения регулируется процессом диффузии, то подъём питательного вещества по стеблю или стволу растения в значительной мере обусловлен явлением капиллярности: раствор поднимается по тонким капиллярным трубкам, образованными стенками растительных клеток.

Следует учитывать и капиллярность почвы, ведь она также пронизана множеством мелких каналов, по которым вода поднимается из глубинных слоёв почвы в поверхностные. Так, для того чтобы происходило более интенсивное испарение влаги из почвы, необходимо уплотнять её. В этом случае в почве образуются капилляры, и влага поднимается по ним вверх и испаряется. Наоборот, разрыхляя поверхность почвы и создавая тем самым прерывистость в системе почвенных капилляров, можно задержать приток воды к зоне испарения и замедлить высушивание почвы. Именно на этом основаны известные агротехнические приёмы регулирования водного режима. По капиллярам кладки зданий происходит подъём грунтовой воды, избежать которого можно лишь проводя гидроизоляцию. По капиллярам фитиля поднимаются горючие и смазочные вещества; на капиллярности основано использование промокательной бумаги и т.п. И наконец, пчёлы извлекают нектар из глубин цветка посредством очень тонкой капиллярной трубы, находящейся внутри пчелиного хоботка.

1.5 Вязкость в жидкостях

Вязкость или **внутреннее трение** - свойство жидкостей, характеризующее сопротивление их течению под действием внешних сил. Вязкость проявляется в том, что возникшее в жидкости движение через некоторое время прекращается.

Явление внутреннего трения в жидкостях отличается от явления внутреннего трения в газах.

В жидкостях молекулы колеблются около положений своего равновесия, и движущаяся масса жидкости увлекает за собой соседние слои в основном за счёт сил межмолекулярного взаимодействия (сил Ван-дер-Ваальса).

Количественно вязкость жидкости характеризуется **коэффициентом динамической вязкости (коэффициентом внутреннего трения)** η , который численно равен силе F , приложенной к единице площади сдвигаемого слоя,

чтобы поддержать в нем ламинарное течение с постоянной скоростью при градиенте скорости, равном единице:

$$\eta = \frac{F}{S \left| \frac{dU}{dZ} \right|}. \quad (13)$$

Так как слой жидкости движется равномерно (ламинарно), то из (13) модуль силы внутреннего трения F_{tr} примет вид:

$$F_{tr} = \eta \cdot \left| \frac{dU}{dZ} \right| \cdot S, \quad (14)$$

где $\left| \frac{dU}{dZ} \right|$ - модуль градиента скорости; S - площадь поверхности сдвигаемого слоя жидкости.

Сила внутреннего трения направлена по касательной к поверхности сдвигаемого слоя и препятствует его движению.

Единицей коэффициента динамической вязкости η в системе СИ служит такая вязкость, при которой градиент скорости с модулем, равным 1 м/с на 1 м, приводит к возникновению силы внутреннего трения в 1 Н на 1 м² поверхности касания слоев. Эта единица называется паскаль–секунда (обозначается Па·с)

В СГС – системе единиц динамической вязкости является пуаз (П). Между паскаль–секундой и пуазом имеется соотношение:

$$1 \text{ Па}\cdot\text{s} = 10 \text{ П.}$$

Наряду с коэффициентом динамической вязкости часто употребляют коэффициент кинематической вязкости ν , который определяется следующим образом:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (15)$$

Из формулы (15) видно, что коэффициент кинематической вязкости равен отношению коэффициента динамической вязкости η жидкости к её плотности ρ .

В системах СИ и СГС коэффициент кинематической вязкости измеряется, соответственно, в м/с и стоксах (см/с).

Существует два режима течения жидкостей. Течение называется ламинарным (слоистым), если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними, и турбулентным

(вихревым), если вдоль потока происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание жидкости (газа).

Вязкость зависит от температуры, причем характер зависимости для жидкостей и газов различен. У жидкостей коэффициент вязкости с повышением температуры уменьшается, у газов, наоборот, увеличивается. Характер зависимости вязкости от температуры связан различием в механизме внутреннего трения в жидкостях и газах.

С ростом температуры жидкости увеличивается среднее расстояние между молекулами, что приводит к уменьшению сил межмолекулярного взаимодействия и вязкости. Кроме того, с повышением температуры жидкости частота колебательного движения и количество переходов молекул увеличиваются, что, в свою очередь, также приводит к уменьшению вязкости жидкости.

2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.1

«Определение коэффициента вязкости жидкости капиллярным вискозиметром»

Цель работы: ознакомиться с одним из методов определения коэффициента вязкости жидкости.

Приборы и принадлежности: вискозиметр Пинкевича, секундомер, термометр, штатив, резиновая груша, дистиллированная вода, исследуемая жидкость.

Одной из важнейших характеристик жидкости является ее вязкость. Формула Ньютона (16) для силы внутреннего трения не может быть использована непосредственно для измерения коэффициента η .

$$F = \eta \cdot \left| \frac{dU}{dz} \right| \cdot S. \quad (16)$$

Ее следует преобразовать к такому виду, который содержал бы величины, достаточно легко определимые экспериментально.

Расчет с помощью уравнения (16), произведенный доктором Пуазейлем, показал, что через капилляр радиусом r и длиной l за время t протекает объем жидкости:

$$V = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \eta \cdot l} \cdot t, \quad (17)$$

где $\Delta P = P_2 - P_1$ - разность давлений на концах капилляра и является причиной движения жидкости.

Формула Пуазеля (17) применяется в эксперименте для вычисления коэффициента η .

Описание метода

Вискозиметр – прибор для измерения коэффициента вязкости жидкости. Есть несколько видов вискозиметров. В нашей работе используется так называемый капиллярный вискозиметр (Пинкевича). Здесь вязкость жидкости оценивается по времени истечения жидкости из узкого канала-капилляра.

На рисунке 15 изображен капиллярный вискозиметр Пинкевича. Он имеет вид U – образной трубки. Правое колено широкое, внизу оканчивается расширением 3. Левое колено узкое, в верхней части его сделаны два сферических расширения 1 и 2.

При работе вискозиметром левое колено заполняется (как правило, лаборантом) исследуемой жидкостью. Для этого требуется с помощью

резиновой груши, зажав пальцем левое отверстие левого колена 1, вытеснить жидкость в правое колено приблизительно до половины верхнего расширения. Далее левое колено освободить. Жидкость под влиянием разности давлений будет свободно течь по капилляру. Когда уровень жидкости достигнет отметки «а», включается секундомер. Выключается он, когда уровень жидкости достигнет отметки «в».

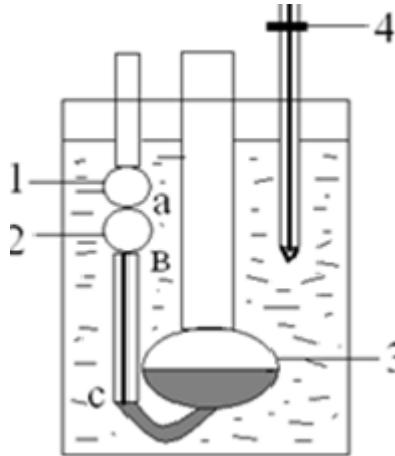


Рисунок 15 – Капиллярный вискозиметр Пинкевича

Таким образом будет измерено время t , за которое истечет жидкость объемом V . Время истечения жидкости t объема V может быть измерено с помощью секундомера.

Закон Пуазейля (17) позволяет рассчитать коэффициент вязкости η по измеренным значениям V , r , $\Delta\rho$, l , t . Однако измерение радиуса и длины капилляра может привести к заметным ошибкам, поэтому формулу (17) применяют, наблюдая время истечения стандартной жидкости и испытуемой.

Сравнение этих двух времен позволяет выразить коэффициент η испытуемой жидкости через известный коэффициент вязкости η_0 стандартной жидкости. В качестве последней обычно применяют воду.

Таким образом, предлагаемый метод измерения вязкости является относительным. Обозначим через t_0 время истечения объема V воды, через t – время истечения такого же объема исследуемой жидкости, тогда на основании уравнения (17) можно написать:

$$V = \frac{\pi r^4}{8\eta_0} \cdot \frac{\Delta P_0}{\ell} \cdot t_0, \quad (18)$$

или

$$V = \frac{\pi r^4}{8\eta} \cdot \frac{\Delta P}{\ell} \cdot t. \quad (19)$$

Приравняем два уравнения (18) и (19), тогда получим:

$$\frac{\pi r^4}{8\eta_0} \cdot \frac{\Delta P_0}{\ell} \cdot t_0 = \frac{\pi r^4}{8\eta} \cdot \frac{\Delta P}{\ell} \cdot t,$$

или

$$\frac{\Delta P_0}{\eta_0} \cdot t_0 = \frac{\Delta P}{\eta} \cdot t.$$

Следовательно, вязкости вычислим по следующей формуле:

$$\eta = \eta_0 \frac{\Delta P}{\Delta P_0} \cdot \frac{t}{t_0}. \quad (20)$$

В уравнении (20) величины ΔP , ΔP_0 являются разностями давлений на концах капилляра l , обусловленные разным весом испытуемой жидкости и воды.

Так как, жидкость течет под действием силы тяжести, то падение давления на капилляре пропорционально плотности жидкости, то есть:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_0} = \frac{\rho}{\rho_0}.$$

Сделав замену в уравнении (20), получим экспериментальную расчетную формулу коэффициента вязкости:

$$\eta = \eta_0 \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \frac{t}{t_0}, \quad (21)$$

где ρ и ρ_0 - плотность испытуемой жидкости и воды.

Коэффициент вязкости зависит от температуры, поэтому вискозиметр погружен в большой цилиндр с водой. Последний выполняет роль термостата.

Порядок выполнения работы

1. Чистый вискозиметр отмыть дистиллированной водой и заполнить порцией воды до верхнего среза расширения 3 (рис. 15).
2. Укрепить вискозиметр на штативе, погрузив его в термостат так, чтобы расширение 1 было покрыто водой.

3. После выравнивания температур воды в вискозиметре и в термостате вставить конец резиновой груши в верхнюю часть широкой трубы вискозиметра и, сжимая осторожно грушу, выдавить воду из расширения 3 в сферическое расширение 2 несколько выше метки (a).

4. Убрать грушу и, наблюдая за понижением уровня жидкости в левом колене, включить секундомер в момент прохождения уровня через метку (a).

5. В момент прохождения уровня воды через метку (в) секундомер остановить и записать показание секундомера.

6. Повторить измерение времени t_0 три раза.

7. Все сказанное повторить с испытуемой жидкостью.

8. Определить по таблице плотность воды и испытуемой жидкости.

9. Результаты измерений записать в таблицу 1.

Таблица 1

Номер опыта	$t_0, \text{с}$	$\Delta t_0, \text{с}$	$t, \text{с}$	$\Delta t, \text{с}$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\frac{\Delta \eta}{\eta}$	$\Delta \eta, \text{Па}\cdot\text{с}$
1							
2							
3							
Среднее значение							

Обработка результатов измерения

1. Вычислить по формуле (21) значение η для каждого измерения.

2. Найти среднее значение $\bar{\eta}$, абсолютную ошибку каждого измерения, среднюю абсолютную ошибку.

3. Результат измерений записать в виде $\eta = \bar{\eta} \pm \Delta \eta$.

4. Рассчитать относительную и абсолютную ошибку по формуле (21).

5. Результаты вычислений записать в таблицу 1.

6. Экспериментальное значение коэффициента вязкости сравнить с его табличным значением и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Строение жидкостей, твердых и газообразных тел.
2. Что называется фазой? Агрегатным состоянием вещества?
3. Сравните свойства веществ, в трех агрегатных состояниях: твердом, жидким и газообразном.
4. Что называют фазовым переходом первого рода? Второго рода?
Приведите примеры.
5. Объясните механизм вязкости жидкости.
6. Какие два вида течения возможны в жидкостях и газах?
7. Как и почему коэффициент вязкости жидкости зависит от температуры?
8. Как и почему коэффициент вязкости газа зависит от температуры?
9. Что такое коэффициент вязкости, его размерность?
10. Вывести расчетную формулу для определения коэффициента жидкости.

3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.2

«Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса»

Цель работы: определение коэффициента внутреннего трения (коэффициента вязкости) по методу Стокса.

Приборы и принадлежности: приборный модуль, секундомер, металлические шарики, микрометр.

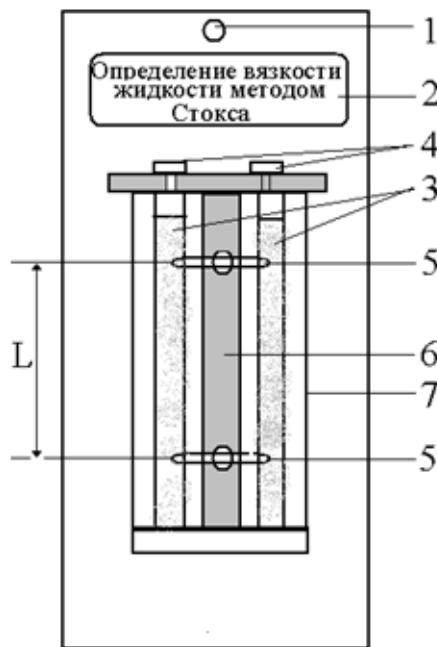


Рисунок 16 – Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 16. На передней панели модуля расположен крепежный винт 1, табличка с названием работы 2, цилиндрические стеклянные колбы 3 с пробками 4, указатели высоты падения шариков 5, измерительная линейка 6, подсветка с отражателем 7, тумблер выключения подсветки.

Экспериментальная установка состоит из двух стеклянных сосудов 3, расположенных симметрично относительно измерительной линейки и заполненных вязкими жидкостями. На измерительной линейке расположены два ползунка (верхний и нижний) спланками. Расстояние между планками равно L . В сосуд 4 опускают поочередно три небольших шарика.

Диаметры шариков предварительно измеряют с помощью микрометра. Расстояние между поверхностью жидкости и верхней планкой подбирают так,

чтобы скорость шарика на участке L между планками была постоянной. В работе измеряют диаметр шариков, расстояние между двумя планками и время движения шарика на этом участке.

Методика эксперимента

Метод Стокса, применяемый в данной работе, основан на исследовании параметров тела обтекаемой формы, движущегося в жидкости. При движении в вязкой жидкости на тело действует сила сопротивления. При малых скоростях и обтекаемой форме тела сила, действующая на него, обусловлена вязкостью жидкости. Слой жидкости, непосредственно прилегающий к телу, прилипает к его поверхности и увлекается им полностью. Следующий слой увлекается телом с меньшей скоростью и т.д.

Таким образом, возникает сила трения. В данном случае нас не интересует собственное трение шарика о жидкость, а мы определяем трение отдельных слоев жидкости друг о друга. Рассмотрим процесс движения тела в жидкости и силы, действующие на него в процессе движения.

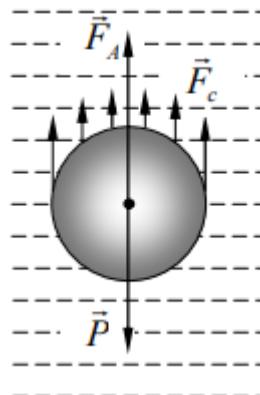


Рисунок 17 – Схема сил, действующих на шарик

Приведена схема сил, действующих на шарик, движущийся в жидкости (рис. 17). На движущийся со скоростью v_0 шарик в вязкой жидкости действуют следующие силы: сила тяжести и сила Архимеда. Запишем формулу силы тяжести:

$$F_1 = \rho_1 g V, \quad (22)$$

где ρ_1 – плотность шарика, V - объем шарика.

Запишем формулу силы Архимеда:

$$F_2 = \rho_2 g V, \quad (23)$$

где ρ_2 – плотность жидкости.

Если шарик падает в жидкости, простирающейся безгранично по всем направлениям, не оставляя за собой завихрений, то, как эмпирически установил Стокс, сила сопротивления среды (сила внутреннего трения):

$$F_3 = 3\pi d v_0 \eta, \quad (24)$$

где v_0 – скорость движения шарика, η - вязкость жидкости.

Очевидно, что при некоторой скорости v_0 сумма сил, действующих на шарик, станет равной нулю, т.е. в соответствии с первым законом Ньютона шарик начнет двигаться равномерно (такое движение шарика называется установившимся). Если скорость движения шарика v_0 постоянна, то уравнение второго закона Ньютона в проекции на вертикальную ось можно записать в виде:

$$F_1 - F_2 - F_3 = 0.$$

Подставляя сюда соответствующие выражения для сил, и учитывая, что объем шарика

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi d^3,$$

получаем выражение для коэффициента внутреннего трения жидкости:

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot d^2}{V}.$$

Установившуюся скорость движения шарика на участке L находим по формуле:

$$v_0 = \frac{L}{t}, \quad (25)$$

где t – время движения шарика между планками.

Тогда расчетная формула вязкости примет вид:

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot t \cdot d^2}{L}, \quad (26)$$

где ρ_1 - плотность материала шариков, ρ_2 - плотность жидкости, L - расстояние между метками.

Порядок выполнения работы

1. Измерить диаметр шарика d с помощью микрометра. Измерения повторить не менее трех раз, каждый раз поворачивая шарик.
2. Результаты измерений занести в таблицу 2. Рассчитать среднее значение диаметра каждого шарика d_{cp} .

3. Измерьте линейкой расстояние h между метками (рис.16).
4. Через пробку 4 опустить шарик в сосуд.
5. Секундомером измерить время t прохождения шариком расстояния L между метками 5.
6. Время равномерного движения шарика записать с точностью до сотых долей секунды.
7. Измерения повторить для трех шариков.

Таблица 2

№ опыта	Измерения диаметра шарика			
	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	d_{cp} , мм
1				
2				
3				

Таблица 3

Номер опыта	l , мм	Δl , мм	t , с	Δt , с	v_0 , м/с	Δv_0 , м/с	η , Па·с	$\Delta \eta$
1								
2								
3								
Среднее значение								

Примечание. ΔL , Δt , Δd - погрешности соответственно масштабной линейки, секундомера и микрометра.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать средний (для всех трех) диаметр шариков по формуле:

$$d_{cp} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 d_i.$$

2. Рассчитать коэффициент внутреннего трения η для каждого опыта.

3. Определить среднее (из трех опытов) значение коэффициента внутреннего трения.

4. Рассчитать погрешность измерений.

5. Записать результат с учетом погрешности измерений в виде:

$$\eta = \bar{\eta} \pm \Delta \eta, \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Контрольные вопросы

1. Как проявляется вязкое трение при относительном перемещении слоёв жидкости? При движении твёрдого тела в вязкой среде?
2. Каковы причины вязкости? В чём отличие вязкости жидкости от вязкости газов?
3. Сформулируйте закон Ньютона для вязкости. Чему равна сила вязкого трения? Что такое градиент скорости?
4. Как зависит сила вязкого трения, действующая на движущийся в жидкости шарик, от его скорости? От размеров шарика?
5. Объясните методику эксперимента.
6. Запишите формулу Ньютона для коэффициента динамической вязкости. Сделайте поясняющий рисунок.
7. Что называется коэффициентом динамической вязкости? Поясните его физический смысл и выведите его размерность.
8. Какие силы действуют на шарик, падающий в жидкости? Сделайте рисунок, запишите второй закон Ньютона для шарика, падающего в вязкой жидкости.
9. Почему, начиная с некоторого момента, шарик движется равномерно?
10. Выведите расчётную формулу для коэффициента вязкости.

4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.3

«Определение коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва капли»

Цель работы: ознакомиться с одним из методов определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

Приборы и принадлежности: аналитические весы, бюретка, небольшие стаканчики.

При медленном вытекании жидкости из капилляра можно заметить, что сначала появляется небольшая капля, которая постепенно растет и, достигнув определенного размера, она отрывается. Капли, образующиеся последовательно одна за другой, имеет одинаковые размеры и вес.

На рисунке 18 изображен момент, предшествующий отрыву капли. Она отрывается по линии $a\ b$, имеющей вид окружности, радиус которой принимается равным радиусу капилляра r . Длина этой линии равна $2\pi r$. Вдоль окружности действует сила поверхностного натяжения. По отношению к свешивающейся части жидкости эта сила направлена вверх, и она удерживает каплю на весу. Итак, для момента отрыва должно соблюдаться условие:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma, \quad (27)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения капли.

Измеряя вес капли P , радиус капилляра r , можно по формуле (27) рассчитать коэффициент поверхностного натяжения.

Однако определение радиуса r окружности, по которой происходит разрыв жидкости, связано с экспериментальными трудностями, и поэтому метод отрыва капли мы применим, сравнивая вес капель жидкости с известным коэффициентом σ_0 и неизвестным коэффициентом σ .

Обозначим через P и P_0 вес капель исследуемой жидкости и стандартной жидкости.

Пользуясь формулой (27), можно записать:

$$P_0 = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma_0.$$

Разделив первое уравнение на второе, получим:

$$\sigma = \frac{P}{P_0} \cdot \sigma_0. \quad (28)$$

Порядок выполнения работы

На рисунке 18 показана установка, используемая в данной работе, где A – бюретка, проградуированная на кубические сантиметры, нижний конец которой отшлифован, S - стаканчик, куда капает жидкость.

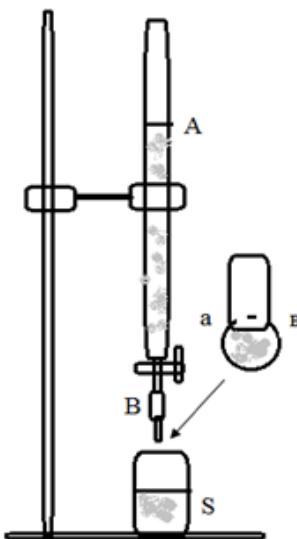


Рисунок 18 – Экспериментальная установка

1. Промыть бюретку и заполнить дистиллированной водой.
2. Взвесить пустой сухой стаканчик на аналитических весах с точностью до 1 мг.
3. Подставить под капилляр другой, не взвешенный стаканчик, и медленно повернуть кран бюретки настолько, чтобы в минуту с кончика капилляра падало 10-15 капель.
4. Не меняя положения крана, подставить под капли взвешенный стаканчик и сразу же начать счет падающим каплям. Отсчитать 60 капель, закрыть кран бюретки, взвесить стакан с водой и рассчитать вес одной капли.
5. Все сказанное выше повторить с испытуемой жидкостью, определить вес одной капли этой жидкости.
6. Полученные результаты измерений подставить в формулу (28) и рассчитать величину коэффициента σ .
7. Значение σ_0 для воды взять из таблиц для температуры, соответствующей температуре воздуха в аудитории.
8. Измерение весов P_0 , P выполнить три раза.
9. Результаты измерений и вычислений записать в таблицу 4.

Таблица 4

Номер опыта	$P_0, \text{г}$	$\Delta P_0, \text{г}$	$P, \text{г}$	$\Delta P, \text{г}$	$\sigma_0, \text{Н/м}$	$\Delta\sigma_0, \text{Н/м}$	$\sigma, \text{Н/м}$	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$	$\Delta\sigma, \text{Н/м}$
1									
2									
3									
Среднее значение									

Обработка результатов измерений

1. Определить погрешность ΔP_0 и ΔP , с которой измерялся вес капель воды и жидкости.
2. По формуле (28) вывести уравнение для определения относительной ошибки и вычислить относительную ошибку.
3. Определить абсолютную ошибку $\Delta\sigma$.
4. Результат записать в виде: $\sigma = \bar{\sigma} \pm \bar{\Delta\sigma}$.

Контрольные вопросы

1. Что называется коэффициентом поверхностного натяжения жидкости (дать силовое и энергетическое определение)?
2. Расскажите об особенностях поверхностного слоя жидкости?
3. Каков физический смысл поверхностного натяжения?
4. Поверхностное натяжение. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения о температуре. Критическая температура.
5. В каких единицах измеряется коэффициент поверхностного натяжения в системах СИ и СГС?
6. Какова природа явлений на границе жидкости и твердого тела?
7. Когда наблюдается: а) смачивание; б) несмачивание жидкостью твердого тела?
8. Чему равен краевой угол при смачивании и несмачивании?
9. Жидкость налита в сосуд. Когда мениск будет вогнутым? Выпуклым? Дайте объяснение?

10. Для каких жидкостей краевой угол тупой?
 11. Чем обусловлено добавочное давление и чему оно равно?
 12. Запишите формулу Лапласа.
13. Выведите формулу, определяющую высоту подъема столба жидкости в капилляре.
14. Капиллярные явления. Приведите примеры.
15. Капиллярные явления в жизни.

4 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Лабораторные работы выполняются студентами в составе подгруппы под руководством преподавателя, каждый студент ведет записи измерений и наблюдений и проводит их анализ самостоятельно.
2. Студент обязан бережно относиться к имуществу, приборам и оборудованию лаборатории.
3. Устанавливать приборы и приспособления, включать электроприборы без разрешения преподавателя и в его отсутствие запрещается.
4. При работе со стеклянными приборами необходимо использовать стеклянную посуду без трещин и осколков, не допускать резких изменений температуры и механических ударов.
5. При выявлении неисправности используемого оборудования немедленно прекратить работу и поставить в известность преподавателя или лаборанта.
6. Запрещается оставлять установку включенной.
7. Не принимать пищу и напитки в лаборатории.
8. При получении травм и плохом самочувствии сообщить преподавателю или лаборанту.
9. По окончании лабораторной работы студенту в лаборатории необходимо наводят порядок и чистоту на рабочем месте. Аккуратно складывают приборы и оборудование в порядке, указанном преподавателем.
10. Каждая лабораторная работа визируется преподавателем после выполнения (снятия данных) подписью в специальном бланке для каждой работы отдельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грабовский, Р.И. Курс физики: учебное пособие/ Р.И. Грабовский. – СПб: Изд-во «Лань», 2012. - 608с.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики: учебное пособие / Т.И. Трофимова.— М.: Издательский центр «Академия», 2015. — 560с.
3. Детлаф, А. А. Курс физики: учебное пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 8-е изд., стер. – Москва: Academia, 2009. – 719 с.
4. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учеб. пособие для вузов: в 5 т. Т. 2 Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006 – 544 с.
5. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие для втузов: в 5 т. Т. 3 Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – М. : КноРус, 2009 – 208 с.
6. Кикоин, А.К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. - М.: Наука, 1976. – 480с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 5 - Дробные и кратные приставки к единицам измерения

Обозначение	Приставка	Множитель	Обозначение	Приставка	Множитель
п	пико	10^{-12}	да	дека	10^1
н	нано	10^{-9}	г	гекто	10^2
мк, μ	микро	10^{-6}	к	кило	10^3
м, m	милли	10^{-3}	М	mega	10^6
с	санти	10^{-2}	Г	гига	10^9
д	деци	10^{-1}	Т	тера	10^{12}

Таблица 6 - Некоторые константы и часто применяемые величины

Постоянная Больцмана	$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Постоянная Авогадро	$N_A = 6.02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$
Ускорение свободного падения	$g = 9.8$ м/с 2
Гравитационная постоянная	$\gamma = 6.67 \cdot 10^{-11}$ Н·м 2 /кк 2
Универсальная газовая постоянная	$R = 8.31$ Дж/(моль·К)
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8$ м/с

Таблица 7 - Плотность некоторых жидкостей

Вещество	ρ , кг/м 3	Вещество	ρ , кг/м 3
Бензин	680-720	Керосин	800
Бензол (при 0° С)	900	Машинное масло	900
Вода	1000	Растительное масло	970
Глицерин	1260	Ртуть	13600
Касторовое масло	960	Спирт этиловый	790

Таблица 8 - Значение коэффициента поверхностного натяжения σ (в мН/м) для некоторых жидкостей при температуре 20 °C

Жидкость	σ м· $\frac{Н}{м}$	Жидкость	σ м· $\frac{Н}{м}$
Вода	72,5	Эфир	17,0
Желчь	48,0	Бензол	29,0
Молоко	50,0	Ртуть	465,0
Спирт	22,0	Золото	1100,0

Таблица 9 - Динамическая вязкость некоторых веществ

Глицерин	$t, {}^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30
	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	12.10	3.95	1.48	0.60
Воздух	$t, {}^{\circ}\text{C}$	0	15	25	50
	$\eta, \text{мкПа}\cdot\text{с}$	17.2	17.9	18.4	19.6
Вода	$t, {}^{\circ}\text{C}$	0	20	100	
	$\eta, \text{мкПа}\cdot\text{с}$	1787	1005	280	
Спирт этиловый	$t, {}^{\circ}\text{C}$	0	20		
	$\eta, \text{мПа}\cdot\text{с}$	1.77	1.2		
Масло касторовое	$t, {}^{\circ}\text{C}$	20			
	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	0.97			

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Казанский государственный аграрный университет»

Институт механизации и технического сервиса

Кафедра физики и математики

Отчёт по лабораторной работе № 1-1¹

«Определение коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва капли»

Выполнил студент
группы
Ф.И.О.

Проверил
ФИО преподавателя

Казань, 20_

